低炭素鋼焼なまし材の塑性ひずみ繰返し応力-ひずみ曲線の解析*

平 修 二** 後 藤 徹***
黒 部 利 次**** 葛 西 靖 正*****

A Study on Cyclic Stress-Strain Relation in Annealed Low Carbon Steel

by

Shuji TAIRA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Toru GOTO

(Mitsubishi Heavy Ind., Ltd., Akashi)

Toshitsugu KUROBE

(Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa)

and Yasuaki KASAI

(Daido Steel Co., Ltd., Nagoya)

The stress-strain behavior of annealed low carbon steel under cyclic straining was investigated, and the results obtained are as follows.

(1) Under cyclic straining of constant total strain ranges of 2, 3 and 4%, the stress range increased with the increase in cyclic number. On the other hand, it decreased when the mean strain of 10% was applied. However, the stress range had a tendency to saturate with increase of cycles in both cases.

(2) The stress σ' -plastic strain ϵ_p' relation in half cycle with the reference point at the tip of hysteresis loop was found to be composed of two linear portions on log-log plotting. The relation was described in the form of

$$\sigma' = K' \left\{ \frac{2\epsilon_{p0}}{\pi} \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} - 2 \tan^{-1} \left(\frac{\epsilon_p' - \epsilon_{p0}'}{a} \right) + \epsilon_{p0}' \right\} \epsilon_p' \left\{ \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\epsilon_p' - \epsilon_{p0}'}{a} \right) + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2} \right\}$$

where α_1 and α_2 are the strain hardening exponents according to the relation of plastic strain in value whether large or small respectively. ϵ_{p0}' is the plastic strain dividing the plastic strain in the semi-cycle into two portions.

(3) Strain range and the number of cycles seem to have little effect on the values of α_1 , α_2 and ϵ_{p0}' . α_1 and α_2 were about 0.18 and 0.08, respectively, and the former was about twice as large as the latter. ϵ_{p0}' was in 0.6-0.9%. The mean strain produced larger value of α_2 in the semi-cycle of straining reverse to the mean strain in its direction.

(4) The two different strain hardening exponents found in the semi-cycle may indicate that the elasto-plastic deformation occurs before plastic deformation during the semi-cycle.

(5) In the saturated hysteresis-loop shape of stress-strain at various strain range, the stress range and plastic strain range was related as follows ;

$$\Delta\sigma = K_0 \Delta\epsilon_p^{\alpha_0}$$

with α_0 of 0.19.

(Received June 5, 1971)

* 本報を「X線による繰返し塑性変形の研究(第1報)」(X-Ray Study on Cyclic Deformation of Metals, I) とする
原稿受理 昭和46年6月5日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 正 会 員 三菱重工(株)神戸研究所 明石市魚住町清水字北沢

**** 正 会 員 金沢大学工学部 金沢市小立野

***** 正 会 員 大同製鋼 名古屋市南区大同町

1 緒 言

繰返しひずみを受ける材料の塑性変形挙動は、繰返し数とともに変化し、またその応力・ひずみ曲線がヒステリシス・ループ状となる事からも明らかのように、一方向の変形挙動を観察する引張試験等では説明され

得ない種々特徴を持っている。それゆえ、動的荷重を受けるのが普通である現実構造部材の応力解析、塑性ひずみ範囲さらにはひずみエネルギーによる疲労累積損傷表示、あるいは現在盛んとなった破壊力学による疲労き裂伝ばの取り扱い、等においては繰返し下での応力とひずみの関係を定量的には握しておく事が必要である。また、疲労の問題における塑性変形は特にき裂発生に関し、単に力学的取扱いのみならず、機構学的にもその役割が明らかにされつつあって、繰返し変形に関する微視的機構的な追求は疲労破壊機構研究の一つの大きな分野といえる。

これら諸点を挙げてみても繰返し下の塑性変形に関する幅の広い研究が望まれる。そこで筆者らは、繰返し変形挙動を巨視的に観察するとともに、X線回折法による変形時の結晶組織の変化を観察し、繰返し下の塑性変形に関して二、三の考察を行なった。本報告においては、S15C 低炭素鋼完全焼なまし材の引張り・圧縮定ひずみ繰返し下における塑性変形挙動について記すが、ひきつづき、X線回折による観察結果を報告する予定である。なお、観察した繰返し下の塑性変形は平均ひずみのない場合および10%引張りの平均ひずみがある場合で、与えた全ひずみ範囲は2~4%である。

2 ひずみ繰返し条件下の変形挙動の表示

Fig. 1 に、任意の繰返し変形を与えた場合の応力-ひずみ曲線を模式的に図示した。同図で、繰返し半サイクル (M 回目のそれは除荷開始点 $O'(M)$ から始まり $O'(M+1)$ で終了するとする) に注目してみると、応力範囲 $\Delta\sigma$ 、全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ 、塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ 、そして平均ひずみ ϵ_{mean} は図中に示されるごとくに定義される。

繰返し変形挙動を観察する場合、 $\Delta\epsilon$ (あるいは $\Delta\epsilon_p$) を一定に保ちながら(1) $\Delta\sigma$ の繰返し数に対する変化に注目する。¹⁾ (2) $\Delta\sigma$ は繰返し数の少ない初期に大きく変化するが後定常化する傾向を示す場合が多いので、定常期において $\Delta\sigma$ 対 $\Delta\epsilon$ (あるいは $\Delta\epsilon_p$) の関係を明ら

Fig. 1. Schematic stress-strain diagram of cyclic deformation.

かにせんとする、あるいは(3)繰返し半サイクルの応力-ひずみ曲線の形自体に注目する、等が考えられる。

本研究においては、変形の機構的追求に意図があるので、(3)の方法を採用し、Fig. 1において O' 点を原点とする $d'-e'$ 座標系をあたえて繰返し変形下の応力-ひずみ曲線 (以後繰返し応力-ひずみ曲線と称する) を解析してみた。なお、本論文で用いられる応力は真応力である。ひずみは絶対値が大きくないので公称ひずみを用いた。

3 実験方法

3.1 試験片

試験片素材の化学組成および機械的性質を Table I に示す。試験片は Fig. 2 に示す形状に機械加工後、950℃30分間の真空焼なましを行ない、さらにネシ部以外に電解研磨を施こして加工層・脱炭層を除去した。

Table I. Chemical composition and mechanical properties of testing material(wt %).

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe
0.16	0.43	0.16	0.13	0.29	0.08	0.02	0.04	Bal

Mechanical properties of testing material	
Tensile strength	40.5 kg/mm ²
Yield stress	26.8 kg/mm ²
Elongation	43.4 (%)
Reduction of area	68.5 (%)

Fig. 2. Test specimen.

3.2 塑性ひずみ繰返し試験

ひずみ繰返しは、室温で全ひずみ制御による引張り・圧縮を与えた。用いた試験機は、ダイ・セットを改造した試験片保持装置を島津製作所製オートグラフ IS-5000 のクロスヘッドと台座間に組み入れたものである。ひずみ測定は、抵抗線ひずみゲージを用いた島津製エクステンソメータを使用した。エクステンソメータの標準標点間長さは 15 mm である。試験機主要部分ならびにエクステンソメータを試験片に装着した状態を Fig. 3 に示す。荷重-伸び曲線は、Fig. 3 に示される荷重計ならびにエクステンソメータの出力を増幅器を通じて X-Y 記録計に自記させた。なお、繰返し速度は、クロス・ヘッド速度一定下のもとで約 2~3 cpm であった。

Fig. 4 に、破壊繰返し数を示す。○点は平均ひずみ

Fig. 3. Main parts of testing machine.

Fig. 4. Plastic strain range-life plot.

のない場合、●点は10%引張平均ひずみを与えた場合の結果である。完全破断繰返し数 N_f と、 $\frac{1}{2}N_f$ で算出した塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ の間には、図中で示されるごとき関係式 (Manson-Coffin 式) が求められた。

4 実験結果

4.1 応力範囲の繰返し数に伴う変化

Fig. 5 に、平均ひずみ 0% および 10% 引張りを与えた場合の各ひずみ範囲繰返し過程における応力範囲 $\Delta\sigma$ の変化を繰返し数 n に対して表示する。同図より明らかなごとく平均ひずみが 0 の場合、 $\Delta\sigma$ は繰返し数の増加とともに急増した後その増加割合は減少する傾向が認められる。一方、平均ひずみがある場合、 $\Delta\sigma$ は繰返し数とともに急減するが、やがてその減少割合は少なくなって、過程の大半においてほぼある値を保っている。(なお、破壊繰返し数近傍での $\Delta\sigma$ の減少はき裂の内部進展による有効断面積の減少を意味している。)

これら、繰返し条件下での応力範囲変化は、それぞれ“繰返しひずみ加工硬化あるいは軟化とそれらの定常化”として良く認められている事実である。Fig. 5 をみるとわかるように、本実験においては、必ずしも

Fig. 5. Variation of stress range during low-cycle fatigue.

明確な定常期 ($\Delta\sigma$ が一定となる時期) の存在を認める事はできなかった。

4.2 繰返し変形下の応力-ひずみ曲線

Fig. 6 に、平均ひずみ ϵ_{mean} が 0%, 全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ が 4% の場合を例にとって各 M における σ' - ϵ' 座標系での応力-ひずみ曲線を両対数で示してみる。同図で ϵ' が約 0.15% 以下では各 M の σ' - ϵ' 曲線は重なっており、また $\epsilon' = 0.1\%$ での σ' は大略弾性常数より求められる値 21 kg/mm^2 となった。そこで、Fig. 1 に説明されている $O_Y(M)$ 点より始まる塑性ひずみ ϵ_p に対する σ' の挙動を観察し以下実験結果を整理した。

Fig. 6. Stress-strain behavior under strain range of 4% without mean strain.

4.2.1 平均ひずみが 0 の場合 Fig. 7 に、Fig. 6 で示した $\epsilon_{\text{mean}} = 0\%$ 、 $\Delta\epsilon = 4\%$ の結果を σ' - ϵ_p' 曲線で表わす。Fig. 6 と比較すると明らかなように、両対数図上で σ' - ϵ_p' 曲線は折れ曲った 2 本の直線部分で近似構成されるようになった。4.1 で述べた“繰返し加工硬化とその定常化”は、Fig. 7 においては、 M の増加とともに σ' - ϵ_p' 曲線がほぼ平行に上方に移行しやがて定着する現象として表現されている。

Fig. 7 で示した σ' - ϵ_p' 曲線は、圧縮荷重の除荷から開始する半サイクルの場合であるので、 M 値は奇数となっている。 M と $M+1$ における σ' - ϵ_p' 曲線の差違は、リュウダース変形の進行が認められる M の極く小さい場合を除いて、半サイクルごとに生じてゆく加工硬化の進行による差以外、次に述べる平均ひずみのある場

Fig. 7. Plastic stress-strain behavior under strain range of 4% without mean strain.

Fig. 8. Plastic stress-strain behavior of $M=3$ and 4 under strain range of 4% without mean strain.

合のような顕著な差違は認められなかった。Fig. 8 に、 $M=3$ および 4 の $\sigma'-\epsilon_p'$ 曲線を示しておく。

以上の現象は、 $\Delta\epsilon=3$ および 2 % の場合にも共通に認められた。

4・2・2 平均ひずみとして 10 % 引張りを与えた場合 Fig. 9 に、 $\epsilon_{\text{mean}}=10\%$ 、 $\Delta\epsilon=4\%$ の場合の結果を、 M が奇数の場合について示す。同図にても明かなように、 $\sigma'-\epsilon_p'$ 曲線は、平均ひずみの無い場合と同様、両対数上で近似的に 2 本の直線部分で構成されうようである。大きい平均ひずみ下において認められる“繰返し加工軟化とその定常化”は、 M の増加とともに $\sigma'-\epsilon_p'$ 曲線が下方に移行しやがて定着する現象として Fig. 9 では表現されている。

Fig. 10 に、 $M=11$ および 12 の $\sigma'-\epsilon_p'$ 曲線を示す。同図にみられるように、両者の形には顕著な差がある

Fig. 9. Plastic stress-strain behavior under strain range of 4% with 10% mean strain.

Fig. 10. Plastic stress-strain behavior of $M=11$ and 12 under strain range of 4% with 10% mean strain.

が、両者の差は主に ϵ_p' が大きい領域における $\sigma'-\epsilon_p'$ 曲線の傾きに認められるようである。平均ひずみ方向と逆方向変形 (M が偶数) での上記傾きは同方向でのそれに比べてかなり大きい。これら応力-ひずみヒステリシス・ループの非対称性は、次節で示すように繰返し数の増加とともに消失する傾向は認められるようであったが、定常期に入ってもその非対称性はかなり大きかった。

4・2・3 繰返し下の塑性変形における加工硬化係数 前項で示したように、除荷開始点を原点とする繰返し下の真応力-塑性ひずみ曲線は両対数図上で折れ曲った 2 本の直線部分から構成されるようである。そこで、Fig. 11 に図解するように、 $\sigma'-\epsilon_p'$ 曲線を ϵ_p' の小さい領域 1 と大きい領域 2 に分け、おのおのの領域における近似直線の傾きからそれぞれの領域での加工硬化係数 α_1 および α_2 を求めた。測定した結果を $\epsilon_{\text{mean}}=0\%$ および 10% の場合に分けて Table II にまとめた。同表で、 ϵ_{p0}' は、Fig. 10 に示されているように両領域の境界塑性ひずみを示す。

Table II の結果から、Fig. 12 に α_1 の値を破断までの繰返し半サイクル数 M_f に対する半サイクル数比 M/M_f を横軸にとりプロットした。同図よりみて、 α_1 は 0.15~0.20 の間でばらついており、 M/M_f やひずみ範囲あるいは平均ひずみに対する依存性は認め難い。Fig. 13 に α_2 のプロットを示す。 $\epsilon_{\text{mean}}=10\%$ で M が偶数の場合、ひずみ範囲や M/M_f に対する依

Fig. 11. Schematic illustration of plastic stress-strain relation in half cycle.

Table II. Plastic stress-strain properties under cyclic deformation.

$\epsilon_{\text{mean}}=0\%$					$\epsilon_{\text{mean}}=10\%$									
$\Delta\epsilon$	M	α_1	α_2	ϵ'_0 (%)	$\Delta\epsilon$	M	α_1	α_2	ϵ'_0 (%)	$\Delta\epsilon$	M	α_1	α_2	ϵ'_0 (%)
4 %	3	.184	.077	.60	4 % (M, Odd)	11	.178	.056	.86	4 % (M, Even)	12	.178	.100	.70
	101	.165	.072	.72		101	.178	.064	.84		102	.170	.100	.90
	441	.173	.082	.86		201	.175	.063	.78		202	.188	.101	.78
	681	.152	.090	.88		441	.172	.076	.92		442	.197	.099	.90
3 %	7	.175	.085	.70	3 % (M, Odd)	21	.163	.076	.76	3 % (M, Even)	22	.172	.110	.77
	201	.150	.090	.88		101	.161	.078	.72		102	.170	.109	.90
	521	.173	.073	.86		401	.188	.068	.86		402	.183	.086	.94
	781	.160	.090	.86		801	.178	.071	.84		802	.181	.102	.88
2 %	23	.175	.085	.60	2 % (M, Odd)	21	.178	.084	.60	2 % (M, Even)	22	.179	.138	.85
	201	.188	.078	.75		201	.162	.084	.74		202	.200	.101	.76
	601	.190	.090	.75		401	.193	.084	.70		402	.192	.102	.72
	1001	.184	.090	.74		1061	.201	.093	.74		1062	.201	.119	.74
	1601	.200	.110	.78		1761	.183	.110	.68		1762	.200	.118	.76

Fig. 12. Plotting of strain hardening coefficient in Region 1 versus ratio of cyclic number.

Fig. 14. Plotting of boundary plastic strain versus ratio of cyclic number.

Fig. 13. Plotting of strain hardening coefficient in Region 2 versus ratio of cyclic number.

存性は認め難く、また値も 0.1 以上となっているが、その他の場合には、概略、ひずみ範囲が小さい程また繰返し数が多い程値が大きい傾向が認められるようであり、値も 0.1 以下となっている。 α_2 の値は、 $\epsilon_{\text{mean}}=10\%$ で M が偶数の場合を除くと、 α_1 の約 $1/2$ 程度の値である。Fig. 14 に ϵ'_{p0} のプロットを示しておく。

$\epsilon_{\text{mean}}=10\%$ の場合には M/M_f に対する依存性は認め難いが、 $\epsilon_{\text{mean}}=0\%$ の場合繰返し初期に急増する傾向が認められた。ひずみ範囲依存性についてみると、ひずみ範囲が大きい程全般的に ϵ'_{p0} 値も大きいようである。値は 0.6~0.9 % 内にあった。

α_2 あるいは ϵ'_{p0} の、ひずみ範囲あるいは繰返し数に対する依存性は、しかしながら、測定値のばらつきから考えてそれ程大きいとはいえないようである。

5 考 察

5・1 繰返し変形下の応力-ひずみ関係式

一般に多結晶金属の引張変形における 応力-ひずみ曲線は次式で表示されることが多い⁶⁾。

$$\sigma = K \epsilon_p^\alpha \quad (1)$$

ここで K は強度係数、 α は加工硬化係数と称されている。繰返し変形定常期における 応力-ひずみヒステリシスループの形は加工履歴の効果が消失するので材料固有の性質を表わしやすいと考えられている⁷⁾。Morrow 等は定常期の応力範囲 $\Delta\sigma$ 対塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$

のプロットを行ない, K_0 および α_0 を材料常数として $\Delta\sigma$ と $\Delta\varepsilon_p$ の間に次式が成立すると報告している.

$$\Delta\sigma = K_0 \Delta\varepsilon_p^{\alpha_0} \quad (2)$$

そこで, $\sigma' - \varepsilon'_p$ 曲線と(2)式の関係を見るため, 結果の内 $\varepsilon_{\text{mean}} = 0\%$ のシリーズで M のもっとも大きい場合を Fig. 15 に再プロットしてみた. $\Delta\sigma - \Delta\varepsilon_p$ 曲線は $\sigma' - \varepsilon'_p$ 曲線群の先端を結んで得られることは容易にわかる. なお同図に, 二, 三他の試験結果もあわせ付記したが, それらは先端点のみを記入した. 同図に示した一点鎖線は, 本実験結果の(2)式的表示である. これより α_0 として 0.19 なる値が求められた.

Fig. 15 Plastic stress-strain behavior at saturation stage.

前章にて示したが, $\sigma' - \varepsilon'_p$ 曲線の加工硬化係数は領域 1 と 2 で異なっており, ε'_{p0} 以下の領域におけるそれ α_1 はほぼ α_0 に近い. それゆえ, ε'_{p0} は, $\Delta\varepsilon$ が小さい程小さくなるようではあるが, その $\Delta\varepsilon$ 依存性は少ないので, $\Delta\varepsilon$ が 0.7% 近傍の値をとる ε'_{p0} 以下では $\sigma' - \varepsilon'_p$ 曲線が(2)式とほぼ合致すると考えられる. しかしながら, $\Delta\varepsilon$ が ε'_{p0} より大きくなると(2)式のごとき単純な表現式でもって $\sigma' - \varepsilon'_p$ 関係は表わし得ない. そこで, $\Delta\varepsilon$ が ε'_{p0} よりも大きい場合も含めて, 繰返し変形下の応力-ひずみ関係を次式のごとく表示してみた.

$$\sigma' = K' A \varepsilon_p'^B \quad (3)$$

$$A = \frac{2\varepsilon'_{p0}}{\pi} \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} - 2 \tan^{-1} \left(\frac{\varepsilon'_p - \varepsilon'_{p0}}{a} \right) + \varepsilon'_{p0} \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$$

$$B = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\varepsilon'_p - \varepsilon'_{p0}}{a'} \right) + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2}$$

ここで K' は領域 1 の関係を(2)式で, $\Delta\sigma$ のかわりに σ' を, $\Delta\varepsilon_p$ のかわりに ε'_p を, そして α_0 のかわりに α_1 を代入して表現した場合の K_0 に相当する. a および a' は, ε'_{p0} 近傍で実験値と(2)式による推定値との近似度を示す量となるが, 小さくとればとる程 2 本の直線部分による近似に漸近する. なお Moreen は, 1100 Al の場合における $\sigma' - \varepsilon'_p$ 曲線の両対数上プロットを行なって, やはり $\sigma' - \varepsilon'_p$ 関係が折れ曲った 2 つの直線部分で表わせることを見出ししているが, かれはその関係を(3)式とは異なった式で表現している.

5・2 繰返し条件下の変形機構について

これまでに示したように, 繰返し条件下のもとでの応力-塑性ひずみ曲線を解析してみると, 繰返し半サイクルの変形範囲は塑性ひずみが 0.7% 近傍を境にして加工硬化係数の異なる 2 つの領域に分けうようであった. Moreen はこの現象を転位論的観点から説明している.⁵⁾ 繰返し塑性変形は可動転位の単純な往復運動 (shuttling) によるとする Watt の考え方を引用し, かれは逆方向に外力が変わると今までに移動した方向への pile up によるバックストレスは逆方向移動を容易にさせるが, そのような効果が顕著である領域がすなわち領域 1 であるとしている.

しかしながら, このような多結晶体の塑性変形挙動を論じる場合, 変形の基本的機構として抽出すべき転位挙動とともに多結晶体としての特徴を無視することはできないと考えられる. すなわち, 多結晶体においては, (1)方位の違いにもとづく結晶粒間のすべりやすさや加工硬化係数の違い, (2)結晶粒界で互いに接する結晶粒相互の変形拘束等がその変形挙動を支配する重要な因子であるとされている.⁶⁾ そこで, 多結晶体をすべりやすさは異なるが, 他の諸性質は等しい 2 つの要素 A および B から構成されているとする. 各要素の応力-ひずみヒステリシス・ループを Fig. 16 (a)~(d) に細線で示されるごとく仮想してみる. すると, 太線で示すような多結晶体のヒステリシス・ループを求めることができよう. なお, (a) および (b) は両要素がひずみ一様で変形する場合および応力一様で変形する場合をそれぞれ示している. それら変形拘束状態を示すモデルを各図右に描いた. (c) および (d) は A と B が同じすべりやすさをもつけれども塑性変形領域において異なる傾きの応力-ひずみ曲線を持つ場合で, それぞれひずみ一様および応力一様変形を示している. すると Fig. 16 中太線で示されるように, (d) の場合や剛塑性体で構成された多結晶体の場合等を除いて, 半サイクルにおける変形には弾性部分, 弾・塑性重合部分, 塑性部分が生じ, 応力-塑性ひずみ曲線で見るとまず傾きの大きい部分が現われ次いでその傾きの小さい部分が生じるといったように, 2 つの領域に区分される事になる. この考察結果は, 実験結果を定量的に説明する事はできないが, 応力-塑性ひずみ曲線が加工硬化係数の異なる, すなわち, 変形様相に何らかの差違のあると考えられる 2 つの領域から成立する事を定性的に示す説明でしよう.⁵⁾

Moreen の考える転位の pile up によるバックストレスは, Fig. 16 (a) あるいは (b) において, 一方向にすべりやすい結晶粒がすべり後たとえ転位密度の増加とともに塑性変形しにくくとしても, 逆方向にはやはりすべりやすい性質を持つとした事の良い説明とな

Fig. 16. Cyclic deformation models.

りうと考えられる。

6 結 言

S15C 焼なまし材を用いて、平均ひずみの無い場合および10%引張りを与えた場合の、全ひずみ範囲一定繰返し下における変形挙動を観察して次の結果を得た。

(1) 全ひずみ範囲2~4%の繰返しを与えると、平均ひずみの無い場合には“繰返し加工硬化”が生じ応力範囲が増加するが繰返し数の増加とともに飽和する傾向を示す。10%引張平均ひずみがある場合には“繰返し加工軟化”を示し、応力範囲は減少しやがてその減少割合は少なくなって、過程の大半においてほぼある値を保つようになる。

(2) 除荷開始点を原点として繰返し半サイクルの応力 σ -塑性ひずみ ϵ'_p 曲線を両対数図上にプロットすると、充分直線で近似しうる2つの部分に分けられた。両部分の境界ひずみを ϵ'_{p0} として、 ϵ'_p の小さい領域における加工硬化係数を α_1 、大きい領域のそれを α_2 とすると、 $\sigma'-\epsilon'_p$ 曲線は次のごとくに数式化し得た。

$$\sigma' = K' A \epsilon'_p{}^B$$

$$A = \frac{2\epsilon'_{p0} \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} - 2 \tan^{-1} \left(\frac{\epsilon'_p - \epsilon'_{p0}}{a} \right) + \epsilon'_{p0} \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}}{\pi}$$

$$B = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\epsilon'_p - \epsilon'_{p0}}{a'} \right) + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2}$$

(3) ひずみ範囲、繰返し数に対する依存性の系統だった変化の傾向は、 α_1 についてみると認められないが、 α_2 および ϵ'_{p0} には存在するようであった。しかしながら、その依存度は大きくはない。なお、 α_1 は0.15~0.20の間にばらついており、平均値として0.18程度の値を示すが、 α_2 は、平均ひずみのある場合で平均ひずみと逆方向に向かう半サイクル過程を除くと、0.1以下となり、 α_1 の約 $\frac{1}{2}$ 程度となった。 ϵ'_{p0} は0.6~0.9%内にあった。

(4) 繰返し数比が $\frac{1}{2}$ 近傍以上の繰返し数領域において、応力範囲 $\Delta\sigma$ と塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ の間には次式が成立するようであった。

$$\Delta\sigma = K_0 \Delta\epsilon_p^{\alpha_0}$$

実験結果から α_0 を求めてみると、約0.19の値が得られた。

(5) α_1 および α_2 といった加工硬化係数の異なる2つの領域が繰返し半サイクルの変形過程に現われる事は、多結晶体の弾・塑性重合変形領域および塑性変形領域がその過程に存在するためであると考えられた。

(昭和46年5月22日 日本材料学会第20期総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Manson, S. S., "Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue" (1966) McGraw-Hill
- 2) Morrow, J., Theo. Appl. Mech. Rep., No. 32, Univ. of Ill. (1968).
- 3) Serensen, S. V., and R. M. Schneiderovitch, Proc. ASTM, **61**, 789 (1961).
- 4) 白鳥英亮, 小幡谷洋一, 日本機械学会論文集, **35**, 705 (1969).
- 5) Moreen, H A, Trans. ASME, Series D, 126 (1970).
- 6) Jaoul, B., "金属の塑性" (1969) 丸善
- 7) Feltner, C. E., and C Laird, Acta Met., **15**, 1621 (1967).
- 8) Watt, D. F., and R. K. Ham, Nature, **211**, 734 (1966).
- 9) Cottrell, A. H., "Dislocations and Plastic Flow in Crystals," Oxford Univ. Press. (1953).