539.433.01:539.389.4:620.178.311.64

疲れ過程における応力ひずみ履歴曲線について*

(III. 重複繰返し荷重による強化の原因)

佐々木 茂 美**

The Micro Plastic Stress-Strain Hysteresis Loops
of Steel during the Fatigue Process(III. An Analysis on the Fatigue Strength under
Multiple Repeated Stresses)

by Shigemi SASAKI

In order to investigate the Cumulative fatigue strength under the double repeated stresses, the stress-strain hysteresis loops were measured through all stages of fatigue process.

The main results obtained are as follows:

(1) The main reason prolonging the fatigue life is caused by the strain aging effect in the case of ascending stressing; and the sums of hysteresis energy accumulating until fatigue failure are increased in the same case.

(2) Under the strain aging effect the magnitudes of hysteresis energy are decreased in the case of ascending stressing, but under not the strain aging effect the magnitudes of one are increased.

(3) The sum-totals of hysteresis energy are proportional to the fatigue life.

(4) The strain aging effect does not cause the variation of fatigue life in the case of descending stressing.

1. 緒 言

重複繰返し荷重を受ける鋼材の疲れ過程では、一般に直線被害則が成立しないとされている。たとえば、基礎的な二段二重重複繰返し荷重の疲れ試験において、一次応力 σ_1 ならびにその応力繰返し数 n_1 を一定とし、二次応力 σ_2 を変えて寿命の変化を調べた前報の実験から、累計繰返し数比で示した疲れ寿命が、第1図のごとき特徴ある変化を示すことなどが判明している⁽¹⁾。ただし図中の σ_{wb} は疲れ限度であり、 N_1 は σ_1 応力を受けた場合の破断までの応力繰返し数を示す。さらに寿命変化の現象は炭素含有量の少ないほど著しいことなどが確かめられている⁽²⁾。

他方、応力振幅一定の普通の疲れにおいて、ヒステリシスループの変化と時効硬化との関係を調べた別の実験結果から、時効による強化現象のピークが、疲れの初期段階に存在することなどが判明している⁽³⁾。

本報は、疲れ過程を分析する考え方⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾を、重複荷重の場合に及ぼして、第1図の寿命変化の原因等を知ることについて検討したものである。

その結果、重複繰返し荷重の荷重増加側の寿命のピークの主因は、時効による強化のためであることなど

$\sigma_1 \approx 27.5 \text{ kg/mm}^2 (1.2 \sigma_{wb})$ (納入状態)

$n_1 / N_1 \approx 1/3$

{ —○— 0.07% C 鋼
—●— 0.47% C 鋼

$n_1 / N_1 \approx 3/4$

{ ...●... 0.07% C 鋼
-○- 0.47% C 鋼

第 1 図

* 昭和 36 年 4 月 5 日 第 38 期通常総会講演会において講演，
原稿受付 昭和 38 年 8 月 23 日。

** 正員，電気通信大学（調布市小島町 14）。

が判明した。

2. 実験結果

ヒステリシスループの面積(内部仕事)が、疲れ過程の諸挙動の原因であり、寿命と密接な関係を有することなどが前報で判明している⁽⁵⁾。他方疲れ過程の時効により材料が強化された場合には、試験中に測定されたヒステリシスループの面積が減少し寿命が増加することなどが前報により判明している⁽³⁾。

本報では、時効の起りやすさを加減した材料を用い、これらに重複荷重を加えた場合のループ面積の変化などから、主として重複荷重による強化と時効による強化との関係などを検討することにした。

2.1 ヒステリシスループの変化現象 供試材の化学成分、試験片の形状、寸法ならびにひずみ測定用のひずみゲージなどは前報^{(3)~(6)}と同じものを使用した。略述すると、材料は0.07%Cの軟鋼ならびに0.12%Cのキルド鋼で、19φの圧延丸棒より平行部11φの試験片に機械加工した。そして、#100番の紙やすりにて研磨仕上してから下記の真空焼なまし処理を施した。すなわち、真空焼なまし炉中において、それぞれ A_{c3} 約 50°C に1時間保持したのち、時効の起りやすさを加減するため、冷却の速度を変えて C, N 等の固溶度を変化させたものである⁽³⁾。なお後述の説明のために、便宜的に、冷却速度 5~10°C/h を徐冷焼

第2図

なまし、30~40°C/h を普通焼なまし、250~300°C/h を急冷焼なましと称することにする。徐冷焼なましをしたものは C, N 原子の固溶量がきわめて少なく時効が起りにくい状態であり、普通焼なましをしたものは C, N の固溶原子が存在して、時効が起り得る状態であり、急冷焼なましをしたものは時効が起りやすい状態のものであることなどが、前報の実験から判明している⁽³⁾。

使用した試験機は片持式回転曲げ疲れ試験機である。回転数は前報と同様^{(3)~(6)}ひずみ測定の場合上、応力繰返し数約 1000 以上は 3000 rpm であり、約 1000 以下は 220 rpm であった。

まずはじめに、疲れ試験中の試験片の一部分(標点距離 3 mm)のヒステリシスループの変化を、前報と同様^{(3)~(6)}、電気抵抗線ひずみ測定器により静的に測定した。なお、1回の測定完了までに要した時間は平均 30 分ずつであった。

2.1.1 重複繰返し荷重の荷重増加側のヒステリシスループの変化 第2図ならびに後述の第5~7図は二段二重重複繰返し荷重の実験結果の一例である。前報^{(3)~(6)}と同様に、図の縦軸の $(\sigma_p \lambda_n) / (\sigma_0 \lambda_0)$ はヒステリシスループの面積の変化割合を示している。第3図に示したごとく、 $\sigma_0 \lambda_0$ は、最初のサイクル $n=1$ における全応力 $\sigma_0 = 2\sigma_g$ と全ひずみ λ_0 との積であり、 $\sigma_p \lambda_n$ は、疲れ過程の n サイクルにおけるループの応力軸方向の最大幅 σ_p と全ひずみ λ_n との積で、ループ面積に関係した値を示している。なお図の $n_1 \equiv 0.5N_1$ は、一次応力 σ_1 、二次応力 σ_2 を一定とし、 σ_1 の応力繰返し数 n_1 を変えて寿命の変化を調べた別の実験において⁽¹⁾⁽²⁾⁽¹¹⁾、寿命変化の最大値付近の繰返し数比 $n_1/N_1 \equiv 0.5$ を示している(後述の第12図参照。なお N_1 は σ_1 応力を受けた場合の破断までの繰返し数を示している)。

第2図は、時効の起りやすい状態、すなわち 0.07%C 鋼の普通焼なまし材を用いた場合の結果である。図の(a),(b)は σ_1 、 n_1 を一定とし、 σ_2 の増加割合を変えた場合(A-13, A-11, A-7, A-5)で、比較の

第3図

ために一定荷重にて試験したもの (A-9, A-14) を図に重ねて示した。重複荷重を加えた場合のループ面積の変化を見ると、荷重増加後急激にループ面積が大となったが、しばらくすると σ_2 に相当した一定荷重のループ面積の変化傾向に接近した。すなわち、一次応力の初期過程でみられたものと類似した変化が荷重増加後にも現われた。そして、繰返し数が増すにつれて一定荷重の曲線に接近する傾向が観察された。なお (a), (b) とともに二次応力に荷重を増した位置からループ面積のピークが現われる位置までの繰返し数は、一次応力として最初に荷重を加えて疲れさせた場合のそれよりも多く、また後述のごとく、累計繰返し数比で示した寿命は (a), (b) いずれも 1 よりは大であった。

第 2 図ならびに後述の第 5~7 図の実験点の記号はヒステリシスループの形を示している。すなわち $\odot$ 、 $\bullet$ は第 4 図の A 形を示し、 $\oplus$ 、 $\ominus$ は B 形、 $\circ$ 、 $\ominus$ は C 形を示している。結局、前報と同様^{(3)~(6)} 疲れ試験中に観察されたヒステリシスループの形は、3 形式の変化に分けられ、破断までに 3 形式が表われた。

第 2 図の (c) は疲れの初期過程における重複荷重の効果をみるため、きわめて初期に繰返し数 n_1 を選んだ場合である。一定荷重の実験に比し、ループ面積の著しい変化は見当らず、また寿命も後述のごとく直線被害則とはほぼ一致していた。

第 4 図

第 5 図

重複荷重の荷重増加後に、疲れの初期段階と類似した現象が現われるという上記の結果は、ヒステリシスループ⁽⁷⁾、かたさ⁽⁸⁾、残留応力ならびに X 線回折線の半価幅⁽⁹⁾、塑性ひずみ⁽¹⁰⁾などの変化を取扱った他の実験結果にも同様に現われていた。

第 5 図は、時効との関係を検討するため、重複荷重の条件を同一にし材料を変えて試験した場合である。(a) は第 2 図と同様に時効が比較的起りやすい状態の軟鋼 (普通焼なまし) の場合であり、(b) は時効がきわめて起りにくい状態のキルド鋼 (徐冷焼なまし) の場合である。(b) をみると、荷重増加後のループ面積の変化傾向は、繰返し数とともにしだいに増加してついに破壊した。これは荷重増加後に (a) のごとき時効による強化が起らなかったためであると考えられる。したがって荷重増加後は、時効による強化が著しく影響するものと推定することができる。(b) の疲れ寿命は、後述のごとく、直線被害則とはほぼ一致していた。なおこれらは後述の考察で述べることにする。

第 6 図は上記をさらに検討するため、二次応力 σ_2 の値を増し、材料を追加した場合の結果である。(a) は第 2 図と同じ 0.07% C 鋼の普通焼なまし材で時効が起りやすい状態のものであり、(b) は 0.07% C 鋼の徐冷焼なまし材で比較的時効が起りにくい状態のものである。なお (c) は 0.12% C キルド鋼の普通焼なまし材による結果で、この場合には、時効はわずかり得るが、キルド鋼のため、(a) よりは起りにくい状態のものである。

第 6 図の (a) は第 5 図の (a) の σ_2 応力が大きい場合に相当している。実験結果をみると、前述の第 5 図と同様、荷重増加後は繰返し数とともにしだいに一定応力のループ面積の変化傾向に接近する傾向がみられた。なお累計繰返し数比で表わした疲れ寿命は後述のごとくわずかに増加していた。第 6 図の (b) では、

第 6 図

荷重増加直後にループ面積の変動が認められたが、第5図の(b)のごとく、その後は繰返し数とともにループ面積は増加した。第6図の(c)をみると、(a)と(b)の両方に類似した現象がみられた。

2.1.2 重複繰返し荷重の荷重減少側のヒステリシスループの変化 第7図は σ_1 , n_1 を一定とし $\sigma_2 < \sigma_1$ とした場合の0.07% C鋼の実験結果の一例である。B-31は徐冷焼なまし材で時効が起りにくい状態のものであり、B-24は普通焼なまし材で時効が起り得る状態のものである。図より両者とも荷重減少にもなう過渡的な変化はわずかであった。またいずれも傾向的にはほぼ同一で、両者の差異は明確ではなかった。なお後述のごとく累計繰返し数比で表わした疲れ寿命は両者とも1より大であった。

2.2 ヒステリシスエネルギーの和について 疲れ寿命とループ面積の和との間には、密接な関係のあることなどが前報の実験で判明している。すなわち、(1)破断までに材料内部になされたループ面積の和と疲れ寿命とは比例すること⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾、(2)疲れ過程の時効により強化される材料では、ループ面積の和が大となることなど⁽⁸⁾である。本報では、重複荷重の場合について検討してみた。

はじめに、荷重変化後のループ面積の和の変化と疲れ寿命との関係を調べた。0.07% C鋼の普通焼なまし

第7図

第8図

材の結果が第8図である。図の縦軸にはループ面積の和をとり、横軸には二次応力 σ_2 の応力超過率をとって示した。●印は一次応力 σ_1 のもので、荷重変化前のループ面積の和を示している。○印は二次応力 σ_2 におけるもので、荷重変化後破断までになされたループ面積の和を示している。図において、一次応力の●はほぼ一定であった。しかるに荷重変化後の二次応力の○印は、後述の疲れ寿命を取扱った第10図(a)と類似した変化傾向を示していることがわかった。これは前報と同様^{(3)~(6)}、寿命とループ面積の和とはほぼ比例することを意味するものと思われる。

次にループ面積の総和と疲れ寿命との関係を、0.07% C鋼の普通焼なまし材について調べた。その結果が第9図である。図より、前報⁽³⁾の一定荷重による●印と、本報の重複荷重による○印とは傾向的に一致していた。すなわち両者とも直線関係が見受けられた。しかし詳細に観察すると両者のこう配は異なっている。これは、疲れ過程の時効による強化の場合には、その

第9図

第10図

強化程度とは無関係に 1 本の曲線上で示される, という前報の一定荷重の実験結果⁽⁹⁾から考えて, 上述の重複荷重の場合の強化の原因は, 時効のみによるものではないらしいということが推論される。

2.3 疲れ寿命の変化現象 以上の実験結果をまとめて, 二段二重重複疲れの σ_2 の変化割合と寿命変化との関係を調べた。その結果が第 10 図である。図の縦軸には疲れ寿命を累計繰返し数比で表わし, 横軸には二次応力の超過率を示した。

本報では荷重増加側をみることにする。図の時効が起りやすい状態の (a) においては, 第 1 図と同一の寿命のピークがこの場合にも認められた。時効の起りにくい状態の (b), (c), においては, 荷重増加側の疲れ寿命のピークは現われず, 二次応力の超過率とともにわずかに寿命を増す傾向が認められた。なお荷重減少側においては, 時効の起りやすさを加減した材料の相違と寿命変化との間には, 明確な関係が得られなかった。これらに関しては続報で報告の予定である。

以上は σ_1 と n_1 とを一定とし, σ_2 を増加した場合の実験であるが, 全体としての結論を得るためには, 少なくとも次の実験が必要である⁽¹⁾⁽²⁾⁽¹¹⁾。すなわち, σ_1 と σ_2 を一定とし, n_1 を変化させた場合である。第 10 図の (c) に使用したものと同一 0.12% C キルド鋼の徐冷焼なまし材 (きわめて時効が起りにくい状態⁽³⁾)を用いた場合の結果が第 11 図である。図より,

第 11 図

第 12 図

この場合にも, 第 10 図の, (b), (c) と同様, 寿命増加は認められず, ほぼ直線被害則に一致した。なお第 11 図の二次応力の超過率 (8%) は, 第 10 図 (a) の寿命のピーク点付近の超過率にほぼ一致させてある。他方, 時効の起りやすい材料では, 一般に第 12 図のごとく, 寿命増加が認められている⁽¹¹⁾。

3. 実験結果に対する検討

二段二重重複繰返し荷重疲れ試験の荷重増加側の寿命のピークの主因は, 時効による強化であるらしいことが前述の実験と検討から推定された。また本報と同じ熱処理を行なった材料により, 一定応力の場合の時効の影響を調べた前報⁽⁹⁾の実験から, ループ面積の特殊な変化と寿命変化が, 時効によるものであることが, 再結晶法, 活性化エネルギーの計算, 時効硬化度の比較などから確かめられている。したがって本報の場合も時効によるものと考えられるが, 念のため, 追加実験的な次の検討を試みた。

3.1 時効硬化が起ったことの検証 まずはじめに, 時効が起りやすい状態であると考えられる材料を用いて検討した。

(A) α 鉄の時効は浸入形固溶原子 C ならびに N の拡散によるものであること, ならびに拡散の活性化エネルギーは 18 000~30 000 cal/mol であること。

(B) 拡散は応力依存形の速度過程として表わされること, したがって, 速度, 温度ならびに応力依存性の存在すること。以上は周知である。

(B) を検討するために行なった実験結果を第 13 図に示した。図の縦軸ならびに横軸は第 10 図と同一で

第 13 図

ある。その他、試験片の形状寸法、試験方法、試験機、一次応力の繰返し数 $n_1 \div 0.5N_1$ 、などが第10図の場合と同一である。供試材は 0.23% C 鋼 (0.23% Si, 0.52% Mn, 0.013% P, 0.02% S, 0.15% Cu) の納入状態のものを機械加工して用いた。速度依存性を調べるためには、試験機の回転数をそれぞれ 3000 rpm, 725 rpm の2種に変えて二段重複荷重の疲れ試験を行なった。応力依存性を調べるためには、二次応力 σ_2 の値を図示のごとく変えた。温度依存性を調べるためには、自動温度調節機により制御された 98°C の一定温度の油に、試験片の全体を油浴させる方法⁽⁶⁾によって疲れ試験を行なった。他方室温 (7月末の日中平均 28°C) の空气中で実験を行なった場合が第10図である。

第13図の実験結果から疲れ寿命の速度ならびに応力依存性の存在することは明白である。しかし荷重増加後の寿命変化の原因が時効によるものかどうかは不明である。なお、温度依存性に関しては後述の第15図で述べることにする。

次にこれらの原因などを知るため、(A)ならびに(B)を検討することにした。

鋼材時効の活性化エネルギーを計算するためには、強度の最大値が得られるまでの時間と温度との関係を知る必要がある⁽³⁾。一次応力 σ_1 その繰返し数 $n_1 \div 0.5N_1$ 、二次応力 σ_2 の応力超過率 8%、試験温度 98°C などを一定とし、第13図と同様に、試験機の毎分回転数のみを変えて二段二重重複荷重の疲れ試験を行なった。その結果が第14図の(a)である。図の縦軸には、第13図と同様、疲れ寿命を累計繰返し数比で示した。図の横軸には、試験開始から荷重増加時まで、すなわち $n=1$ から $n=n_1$ に達するまでの時間を秒単位で表わした。

図より、二段重複荷重疲れの σ_2 増加による強化は、荷重増加時の時間に依存することがわかった。ま

第14図

た寿命の最大値が得られたときの荷重増加時 n_1 の時間は約4分であった。なお、応力依存性を調べるために、 σ_2 の超過率を 14.5% に選んだ場合が図の(b)である。全般的な傾向は(a)と同一であったが、応力の高い(b)のほうが寿命はながかった。したがって応力依存性が認められた。

次に温度を変えた場合の実験をみることにする。室温における実験が第10図である。荷重増加後の寿命のピークが表われた(a)について検討する。第10図(a)の寿命のピークが表われる σ_2 の超過率は8%である。上記の第14図(a)の8%は、これに一致させた値である。なお、第10図の $n_1 \div 0.5N_1$ は σ_1 , σ_2 を一定とし、 n_1 を変えて寿命の変化を調べた第12図など⁽¹⁾⁽¹¹⁾の実験において、寿命の最大値が表われるときの n_1 を示している。第10図(a)の寿命のピーク点に相当する A-11, A-13 の疲れ過程の変化を示したのが第2図の(a)である。第2図(a)において、荷重増加後の σ_2 過程の強化について考えてみる。

疲れ過程で強化が起るとループ面積は減少するといことが、前報⁽³⁾⁽⁵⁾によって判明している。また本報の時効の起りにくい材料の場合には、第5~6図などのように、荷重増加後ループ面積ははだいに増加している。これらから、第2図の(a)の場合には、荷重増加後、ループ面積の変化が一定荷重の曲線に一致したところ、すなわち、 $n \div 8.6 \times 10^4$ 回で強化が著しいと考えられる。このときの試験温度は (7月末の日中の室温の平均 28°C) + (試験片の温度上昇⁽⁵⁾) の平均

第15図

値 19°C)= 47°C である。また時間は〔疲れ試験 ($n=1000$ まで 4.5 分)+($n=1000\sim 8.6\times 10^4$ まで 28.3 分)〕+〔ヒステリシスループの静的測定⁽²⁾の平均(30分 $\times 14$ 回)〕=452.9 分である。次に、前述の第 14 図 (a) の場合について検討した。試験温度は 98°C である。 σ_2 による強化が著しいと考えられる時間は (n_1 に達するまでの時間 4 分) $\times 1.43 \div 5.7$ 分である。ただし、この場合にはヒステリシスループの測定は行なわなかった。なお、上記の時間の算定は下記である。第 2 図 (a) の 8.6×10^4 は $n_1=6\times 10^4$ の 1.43 倍に当るから第 14 図の場合も 4 分の 1.43 倍で 5.7 分を選んだ。活性化エネルギーを求めるため、縦軸に時間を秒でとり、横軸に温度を絶対温度でとって整理した結果が第 15 図である。図の直線のこう配から活性化エネルギーを求めたところ $\Delta H \div 20\,210\text{ cal/mol}$ であった。これは鋼材時効の拡散の活性化エネルギーに一致している。

次に、固溶原子の移動距離を検討してみた。Nabarro⁽¹²⁾によると拡散時の原子の移動距離 x と平衡が成立するまでの時間 t との間には、近似的に次の関係があるとされている。

$$t \div \frac{x^2}{2D} \dots\dots\dots (1)$$

0.07% C 鋼
焼なましの冷却速度 $30\sim 40^{\circ}\text{C/h}$

0.12% C キルド鋼
焼なましの冷却速度 $250\sim 300^{\circ}\text{C/h}$

0.07% C 鋼
焼なましの冷却速度 $5\sim 10^{\circ}\text{C/h}$

0.12% C キルド鋼
焼なましの冷却速度 $5\sim 10^{\circ}\text{C/h}$

第 16 図

ただし、 D は拡散係数である。鉄中の C 原子の 98°C における拡散係数は $D \div 10^{-13}\text{ cm}^2/\text{s}$ である⁽¹³⁾。上式に第 14 図 (a) の $t=5.7$ 分=342 秒を入れると $x = 6.9\times 10^{-6}\text{ cm}$ が得られた。これは他の実験⁽¹⁴⁾、転位密度⁽¹⁵⁾、モザイクブロックの大きさ⁽¹⁶⁾などとの比較から推定して妥当な値であるといえる。以上の検討結果から時効硬化が起ったものと考えることができる。

3.2 熱処理条件の相違に基く組織変化

時効の起りやすさを加減するために、焼なましの冷却速度を変えたことが、本報の実験結果にいかなる影響を及ぼしたかということを検討することにした。焼なましの冷却速度の変化による材料の内部変化としては、

- (1) C ならびに N 固溶原子の含有量が異なる。
- (2) 結晶粒度、パーライトの形、分布状態など組織が異なる。などが考えられる。

(1) の検討に関しては上記の 3.1 節で述べた。

(2) の影響を調べるための実験結果が第 16 図の顕微鏡写真であり、これを整理したのが第 17 図である。図の縦軸には冷却速度の平均値をとり、横軸には結晶粒度を示した。なお、粒度測定には切断法⁽¹⁷⁾を採用した。図をみると、冷却速度がおそいほどわずかながらフェライト結晶粒の直径が大きくなっていた。この

ことは低炭素鋼の 0.07%C 鋼の場合に著しかった。しかしながら疲れ寿命に及ぼす結晶粒度の大きさの影響は、 α 鉄の室温中では、あまりたいしたことが無いとされている⁽¹⁸⁾。その他、第 16 図からは、パーライトの形などにわずかの差異がみられた。重複荷重の強化現象に及ぼすこれらの影響に関しては、現在不明である。なお、前述のごとく、前報の検討結果⁽³⁾などからも本報と同種の変化が、時効のためであることが確かめられている。結局は、本報の第 10 図 (a) の寿命のピークの主要原因ならびにループ面積の特殊な変化などは、前述の検討結果などから時効による強化のためであると推定できる。

4. 実験結果の考察

重複繰返し荷重疲れの強化の原因と時効硬化との関係について、本報の実験結果の範囲内で、簡単に考察することにした。

4.1 荷重増加の場合 まずはじめに、第 2 図ならびに第 5~6 図について考えてみた。時効の起りやすい状態の材料と起りにくい材料の差異は、荷重増加後の σ_2 疲れ過程で著しかった。荷重増加後にループ面積が減少するのは荷重増加のために C, N 固溶原子の拡散がより大となり、Cottrell 効果など⁽¹⁹⁾のために、転位などがさらに動きにくくなり強化されたためであると考えられる。また、荷重増加後にループ面積がしだいに増加するのは、C, N 原子が存在していないので、上記の強化が起らなかったためであると考えられる。なお、ループ面積のピークが現われる位置までの繰返し数は、 σ_1 よりも荷重増加後の σ_2 のほうが多いという現象は、荷重を増したために時効の現われ

方が一定荷重 σ_1 の場合よりも増加したためではないかと推定される。この理由は、一定荷重の疲れ過程では、時効による強化が大であるものほど、ピークが現われる位置までの繰返し数が多くなるという結果が、前報により⁽³⁾、報告されているからである。

第 8 図のピークの理由は、時効による強化のために、ループの幅が狭くなるので破壊までの繰返し数が増加し、その結果として、 σ_2 増加後のループ面積の和が増加したためであると考えられる。

第 10 図 (a) ならびに第 12 図の場合には、寿命にピークが現われるが、第 10 図 (b), (c) ならびに第 11 図の場合には、ピークが現われなかった。この理由は、前者の材料には C, N 固溶原子が存在し、後者には存在していないと考えられるので、明らかに、ピークの原因は時効による強化のためであるといえる。第 1 図の寿命変化の原因も、同様に考えることができる。またこれらの場合、低炭素鋼ほどピークが大であるのは、低炭素鋼ほどより時効が起りやすいためであると考えられる。

第 13 図において、3 000 rpm の場合には寿命が大となったが、725 rpm の場合には寿命が短くほぼ直線被害則と一致した。この理由は第 14 図の結果から判断することができる。時効が起る場合、拡散すべき C, N 固溶原子の量にはある限度が存在するとされている⁽²⁰⁾。725 rpm で $n_1 \div 0.5N_1 \div 5 \times 10^4$ まで疲れ試験を行なった場合の荷重増加時の時間は 4.1×10^3 秒である。したがって第 14 図から推定されるように、すでに σ_1 の疲れ過程で、C, N 固溶原子が拡散されてしまったので、 σ_2 の疲れ過程では拡散すべき C, N 原子が存在せず時効による強化が起らなかったためであると考えることができる。

4.2 荷重減少の場合 疲れ試験の途中で、 σ_1 から σ_2 に荷重を減少した場合には C, N 固溶原子の拡散はより少なくなるはずである。というのは、時効が応力依存の速度過程として理解されているからである。したがって、第 7 図のごとく、時効の起りやすさを加減した材料による差異は現われてこなかった。また第 10 図のごとく、時効の起りやすさを加減した材料と寿命との間にも、明白な関係は得られなかった。結局、第 10 図などの荷重減少側の寿命変化の原因は、時効に関係したものではないと考えられる。これらの原因については目下研究中である。

5. 結 論

時効の起りやすさを加減した鋼材を用い、二段二重重複繰返し荷重疲れの寿命変化の原因等を知るための

実験と検討を行なった。得られた結論のおもなものは次のごとくである。

- 1) 荷重増加後の寿命のピークの主要原因は時効による強化のためである。
- 2) 時効の起りやすい状態の材料では、荷重増加後の時効による強化のために、ヒステリシスループの面積が減少する傾向がある。
- 3) 時効の起りにくい状態の材料では、荷重増加後、ループ面積の増大する傾向がある。
- 4) 時効の起りやすい状態の材料では、荷重増加後ヒステリシスループの幅が狭くなるので寿命が増加する。その結果として、ループ面積の和も増加する。
- 5) 疲れ寿命とループの面積の総和は比例する。
- 6) 荷重減少後の寿命変化は時効によるものではない。

以上から荷重増加後の疲れ過程の時効硬化が、重複荷重疲れの強化の一因であることが判明した。

終りに、本報の一部は防衛大学校において行なわれた。本研究の遂行に当りご指導とご援助をいただいた防衛大学校教授 郡 利矩博士に厚く感謝申し上げます。

なおご指導ならびにご援助いただいた電気通信大学教授 田中 栄博士に厚く感謝申し上げます。また実験に協力された沢頭一豪、柿谷勲夫君などの学生諸君にも感謝する次第である。これらの方々のご好意によって本報が完成された。

文 献

- (1) 川田・ほか 2 名, 機械学会論文集, 25-159 (昭 34-11), 1147.
- (2) 郡・佐々木, 機械学会論文集, 25-159 (昭 34-11), 1159.
- (3) 佐々木, 機械学会論文集, 29-206 (昭 38-10), 1507.
- (4) 郡・佐々木, 機械学会論文集, 29-200 (昭 38-4), 681.
- (5) 佐々木, 機械学会論文集, 29-206 (昭 38-10), 1515.
- (6) 郡・佐々木, 材料試験, 11-106 (昭 37-7), 434.
- (7) N. Thompson & others, *J. Inst. Metals*, 84 (1955), 73.
- (8) 川田・中沢, 材料試験, 8-75 (昭 34-12), 897.
- (9) 平・本田, 機械学会論文集, 28-188 (昭 37-4), 452; 平・ほか 2 名, 28-194 (昭 37-10), 1335.
- (10) 河本・ほか 4 名, 機械学会論文集, 29-197 (昭 38-1), 40.
- (11) 関戸・ほか 2 名, 材料試験, 8-73 (昭 34-10), 787, 793.
- (12) F.R.N. Nabarro, *Report of Conference on the Strength of Solids*, (1947) Britol, England.
- (13) B. Chalmers 編, A.D. Le Claire; *Progress in Metal Physics*, 4 (1953), 265, Pergamon.
- (14) たとえば J.C. Levy & G.M. Sinclair, *Proc. ASTM*, 55(1955), 866; 西原・ほか 4 名, 機械学会論文集, 24-143(昭 33-7), 445.
- (15) 山田・柿内, 材料試験, 9-78 (昭 35-3), 184.
- (16) B. Chalmers & R. King 編, P. B Hirsch; *Progress in Metal Physics*, 6 (1956), 236, Pergamon.
- (17) 鋼のフェライト結晶粒試験方法, JIS G 0552 (1956).
- (18) たとえば, H. Hendus u. G. Krause, *Z. Metallkunde*, 46(1955), 716; 横堀・前川, 第 38 期通常総会講演会前副集, No.37 (昭 36-4), 21.
- (19) たとえば, A. H. Cottrell, *Dislocation and Plastic Flow in Crystals*, (1953), 133, 147, Oxford; 日本金属学会編, 幸田・鈴木, 転位論の金属学への応用, (昭32), 103, 丸善.
- (20) たとえば, 川崎・ほか 2 名, 金属学会誌, 25-1(昭 35-1), 68; 桜井・川崎, 機械の研究, 11-5 (昭 34-5), 647.

30 卷 209 号(昭 39-1) 正 誤 表

執 筆 者	ページ	欄	行	誤	正
岩 元 兼 敏	60	第 2 表		(熱処理) 85°C	850°C
	61	(1)式		$D = a - \frac{b}{t + c}$	$D = a - \frac{b}{t + c}$
玉 手 統	90	(8)式		$\beta = (\log \kappa / 2\pi)$	$\beta = (\log \kappa) / 2\pi$
	95	(23)式	第 1 段	$\sigma_y - i\tau_{xy} = \dots$	$\sigma_y - i\tau_{xy} = \dots$
小 泉 堯他	105	左	下 6	$p = \dots$	$P = \dots$
山 本 敏 男他	156	左	11	$d_{2d} = \dots$	$p_{2d} = \dots$
	〃	(26)式		(3 行 3 列めの要素は) $(1 + \mathcal{A})s^2 + c_2s$ $+ \{\delta + (i_p - 1 - \mathcal{A})\omega^2\}$	$(1 - \mathcal{A})s^2 + c_2s$ $+ \{\delta + (i_p - 1 - \mathcal{A})\omega^2\}$
	〃	(8・a)式		$\dots - K_6's^6 + \dots$	$\dots + K_6's^6 + \dots$
	159	左	14	$\xi_0 / \mathcal{A}$	$ \xi_0 / \mathcal{A}$
山 本 敏 男他	162	右	16	$1.05 < \omega < 1.18$	$2.10 < K < 2.18$
三 浦 宏 文	174	(56)式		$N = \dots \frac{5}{8} \frac{b^4 \cos^4 \theta_0}{(a + b \sin^2 \theta_0)^4}$	$N = \dots + \frac{5}{8} \frac{b^4 \cos^4 \theta_0}{(a + b \sin^2 \theta_0)^4}$