鋼の回転曲げ疲労過程で発生するひずみ エネルギー変化に及ぼす温度変化の影響*

南 澤 力** 青 木 望**
芳 賀 武*** 石 田 有 示****

The Effect of the Circumferential Temperature Change on the Change in the
Strain Energy of Carbon Steel during the Rotatory Bending Fatigue Test

by

Chikara MINAMISAWA, Nozomu AOKI

(Department of Mechanical Engineering, the Defense Academy, Yokosuka)

Takeshi HAGA

(Department of Mechanical Engineering, Nagano Technical College, Nagano)

and Yuhji ISHIDA

(Department of Mechanical Engineering, the Defense Academy, Yokosuka)

By applying a method of analyzing the plastic and quasi-elastic strain energies on the actual fatigue tests of carbon steel, the authors previously made clear the effect of temperature change in the atmosphere around specimens on the change in strain energy of one kind of carbon steel and obtained the relationships between these energies and the structural changes appearing gradually on the surface of specimen. Furthermore, the dependence of the features of fractographs on the temperature conditions was also investigated.

In the present experiment, the following four cases were adopted as the temperature conditions of atmosphere around the specimen: (1) the constant temperature at $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ up to rupture of the specimen, (2) the constant temperature at $-20 \pm 2^\circ\text{C}$, (3) changing the temperature from $+20^\circ\text{C}$ to -20°C after a certain number of cycles and (4) changing the temperature in the reverse way of (3).

The main results obtained are as follows:

(1) The circumferential temperature change brought in a certain stage on the fatigue process has important effects upon several fatigue phenomena including the strain energy changes and the failure repetitions of a specimen.

(2) The change in the sum of quasi-elastic strain energy with the progress of fatigue can be expressed generally in $\sum_{q=1}^q (U)_q = A \cdot q^k$ up to rupture of specimen, where A is the initial value defined by the ordinary elastic energy calculation, q is the number of stress repetitions, k is a constant depending upon the property of test material, the method of experiment and the circumferential temperature condition.

Using this expression and the statistical values for the fatigue life (N) and $\sum_{q=1}^q (U)_q$ obtained by the test under the constant temperature condition ($+20 \pm 2^\circ\text{C}$), the fatigue lives under other temperature conditions can be inferred approximately.

(3) If the sum of the plastic strain energy, $\sum_{q=1}^q (E_p)_q$, is plotted logarithmically, two nodal points C and D appear. The point C appears to have relation with the occurrence of a slip band, and the energy quantity at this point was a constant about 10 kg-m, independent of the

* 原稿受理 昭和47年10月16日

** 正 会 員 防衛大学校 横須賀市走水

*** 正 会 員 長野工業高等専門学校 長野市大字徳間

**** 学生会員 防衛大学校 横須賀市走水

stress amplitudes and of the temperature conditions. Therefore, it was found that the critical value of the energy accumulation in a specimen was related probably to the origination of the slip band. On the other hand, the point D appears to have connection with the appearance of intrusions, and the critical energy is considered to have relation to their appearance.

(4) Fractographs collected in the vicinity of the central portion of the fracture surfaces were studied and it was found that their features were dependent upon the temperature conditions after change.

(Received Oct. 16, 1972)

1 緒 論

ふん囲気温度が疲労試験中に $+20^{\circ}\text{C}$ と -20°C 間で変化した場合、鋼の回転曲げ疲労寿命および疲労進行過程における試験片のたわみ変化に対しその温度変化がいかなる影響を及ぼしたかについてはすでに調査し報告した¹⁾。

本論文では、さきに提案し、さらに数値解析例をも示したひずみエネルギー解析法を用いて、鋼の疲労進行過程で発生するひずみエネルギー変化に及ぼす温度の一段変化、すなわち、ふん囲気温度の $+20^{\circ}\text{C}$ から -20°C およびこの逆の変化の影響を調査し、かつ、逐次試験片表面に発生する組織変化とひずみエネルギー変化との関係を明らかにし、さらに疲労破面にふん囲気温度条件に起因する差異が残されるか否かを調査した。

そして、ひずみエネルギーのうち擬弾性ひずみエネルギー総和量の疲労進行に伴う特徴的变化を調査したところ、 $+20^{\circ}\text{C}$ 一定温度ふん囲気下の実験と解析結果を利用して、 -20°C 一定温度ふん囲気下、 $+20^{\circ}\text{C}$ から -20°C およびこの逆の温度変化を伴う各ふん囲気下におけるおのおのの疲労破壊発生繰返し数の推定が近似的に可能であることを示し、さらにもう一種類のひずみエネルギー、すなわち塑性ひずみエネルギー総和量の疲労進行に伴う特徴的变化と表面組織の変化との関連から、すべり帯の発生または形成にはふん囲気温度やその変化に関係のないひずみエネルギーの限界値が存在するらしいことを見だし、そして intrusion の発生にもエネルギー限界があるらしいことおよび応力振幅がある値を越えるところの限界は低下することを見だした。そして最後に、疲労破面の観察から変化後のふん囲気温度条件に依存した特徴が残されていることがわかった。

2 実験方法

2・1 試験片準備

用いた試験片材料は Table I にその含有化学成分と焼なまし材の静的引張試験による機械的性質とが示される 0.14% C 構造用炭素鋼材である。Fig. 1 に試験片の形状と寸法を示し、試験部分を焼なまし後、6# エメリー紙で研摩し、ついで 5% 硝酸アルコールと 5% ピクリン酸アルコール溶液で腐蝕し、結晶粒を確認して供試片とした。供試材のフェライト結晶粒度番号は 7 番であった。さらに、供試片に含まれるパーライト・パッチの大きさに関する存在頻度を調査して、Table II を得た。その結果、パーライト・パッチの分布は良好であり、その形状は近似的球状でかつ比較的微細であった。

Fig. 1. Shape and size of a specimen (the replicas are collected in the vicinity of the points, a, b, and c on the surface).

2・2 疲労試験の方法と温度変化

疲労試験は試験速度 2850 r. p. m. の高温用小野式回転曲げ疲労試験機を用いて実施した。一定温度 $+20^{\circ}\text{C}$ および -20°C は、すでに報告した低温装置で実現し、 $+20^{\circ}\text{C}$ から -20°C への温度変化および逆の -20°C から $+20^{\circ}\text{C}$ への温度変化は、すべて繰返し数 $q=2.5 \times 10^4$ サイクルにおいて試験を一時休止し、試験片温度が充分に所要温度、すなわち、 -20°C または $+20^{\circ}\text{C}$ に到達した後試験を再開して、以後破壊に至るまで続行した。

Table I. Chemical composition and mechanical property.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Tensile strength (kg/mm ²)	Upper yield point (kg/mm ²)	Lower yield point (kg/mm ²)	Elongation (%)
0.14	0.28	0.41	0.010	0.017	35.5	27.3	21.8	51.7

Table II. Property of pearlite patch included in the steel.

Ferrite grain size	Shape	Mean volume (μ^3)	Max. volume (μ^3)	Existence frequency (%)		Mean distance (μ)	Mean distance between large pearlite patches (μ)
No. 7 (JIS GO 552)	Nearly spherical	753.4	5 432	$2\ 830\ \mu^3 < 9.5$	$5\ 196\ \mu^3 < 3.5$	15.5	57.2 ($2\ 830\ \mu^3 <$)

Fig. 2. The approximate S-N curve and the fatigue lives of test specimens under the respective temperature conditions.

本実験における温度に関する誤差範囲は $\pm 2^\circ\text{C}$ であった。

この疲労実験で得た近似的 S-N 曲線を Fig. 2 に示した。本研究の主な疲労試験は応力振幅 $\sigma = 20 \text{ kg/mm}^2$ で行なわれた。これより低い応力振幅による試験では、 -20°C 一定温度 ふん囲気において繰返し数 $q = 10^7$ を越えても試験片に破壊が起こらず、ふん囲気温度変化の影響調査という本研究の目的達成のため、 $\sigma = 20 \text{ kg/mm}^2$ の応力振幅を採用したわけである。

図において、○は $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、△は $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、□は $q = 2.5 \times 10^4$ サイクルにおいて -20°C から $+20^\circ\text{C}$ へ温度変化が与えられた場合および□はこの逆の温度変化を与えた場合の各温度条件下におけるそれぞれの試験片破断繰返し数を示す。

2・3 ひずみエネルギー解析法²³⁾

ひずみエネルギーの解析は前論文で提案した方法、すなわち、擬似弾性ひずみエネルギー $(U)_q$ および塑性ひずみエネルギー $(E_p)_q$ の 1 サイクル当たり各発生量を表わす次式

$$\left. \begin{aligned} (U)_q &= \frac{4\sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l}{Q_q} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right)}{(m_q+1)(n_q+3) \Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right)} \cdot \sigma_q \cdot (D_q \cdot \bar{\delta}_{q,s}) \\ (E_p)_q &= \frac{4\sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l}{n_q+3} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right)} \cdot \left\{ \frac{\sigma_q(D_q \cdot \bar{\delta}_{q,s})}{(n_q+1) \cdot P_q} - \frac{\sigma_q \cdot (D_q \cdot \bar{\delta}_{q,s})}{(m_q+1) \cdot Q_q} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

およびこれらの疲労進行に伴う各総和表現

$$\sum_{q=1}^q (U)_q, \quad \sum_{q=1}^q (E_p)_q \quad (q=1, 2, \dots, q) \quad (2)$$

をそれぞれ用いて行なわれる。ここで R は試験片の試験部分半径、 l は長さを表わし、 D_q は動係数で、任意の繰返し数 q における試験部分中央の動的たわみ $\bar{\delta}_q$ と一時休止直後実施する静的曲げ試験における最大

Fig. 3. Half hysteresis curve.

たわみ $\bar{\delta}_{q,s}$ との比 ($D_q = \bar{\delta}_q / \bar{\delta}_{q,s}$) で定義され、 P_q と Q_q はたわみのひずみ変換係数である。また、 n_q と m_q は上述の静的曲げ試験で得られる履歴曲線に D_q を作用させて動的曲線 (Fig. 3) に変換し、その曲線をそれぞれ単項べき関数、すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{q,y} &= \alpha_q \left(\frac{1}{P_q} \cdot \bar{\delta}_{q,y} \right)^{n_q}, & \sigma_q &= \alpha_q \left(\frac{D_q}{P_q} \cdot \bar{\delta}_{q,s} \right)^{n_q} \\ \sigma_{q,e,y} &= \beta_q \left(\frac{1}{Q_q} \cdot \bar{\delta}_{q,y} \right)^{m_q}, & \sigma_{q,e} &= \beta_q \left(\frac{D_q}{Q_q} \cdot \bar{\delta}_{q,s} \right)^{m_q} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、

α_q, β_q は定数、 $\bar{\delta}_{q,s}$ は最大回復たわみ、 $\sigma_{q,e}$ は回復最大応力、

で近似したときのべきをそれぞれ表わす。

動的たわみ $\bar{\delta}_q$ 、静的最大たわみ $\bar{\delta}_{q,s}$ および静的回復たわみ $\bar{\delta}_{q,s}$ の測定は先端にミニチュア・ローラーベアリングをとりつけたダイヤル・ゲージ (最小目盛、 $1/100 \text{ mm}$) を使用して行なわれた。

実際のひずみエネルギー解析には、応力振幅 20 kg/mm^2 の疲労過程において、まず、 $+20^\circ\text{C}$ 一定温度および -20°C 一定温度両条件の場合それぞれ 3 本の試験片が用いられ、さらに繰返し数 $q = 2.5 \times 10^4$ サイクルにおいて $+20^\circ\text{C}$ から -20°C へ及びこの逆の温度変化が与えられたそれぞれの場合に対しては各 2 本の試験片が用いられた。

2・4 組織変化と破面の観察方法^{2)~5)}

前論文では炭素鋼の室温における回転曲げおよびねじり両疲労過程において、疲労進行に伴って発生する塑性ひずみエネルギー総和量変化に各疲労過程をそれぞれ 5 段階に区分する 4 節点がおのおの特徴的組織変化と密接な関連をもって現われたことを確認し、報告した。本研究ではふん囲気温度 $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ および $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ 下の各疲労過程におけるひずみエネルギー変化と試験片表面に逐次現われる各種組織変化との関連を明らかにするため、各疲労過程の数段階に相当するそれぞれの繰返し数において Fig. 1 の試験片表面の 3 点 (a, b, c) 近傍からレプリカを採取して、各組織変化の発生するそれぞれの繰返し数を電子顕微鏡観察により推定した。

さらに疲労破面からふん囲気温度条件とその変化に起因する痕跡が発見できるか否かを確認する目的から、

観察のための位置決めが比較的容易な破面中心の近傍からレプリカを採取して電子顕微鏡により調査した。

3 実験結果

3.1 たわみの測定結果と動係数

温度 $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ に保持し、応力振幅 20 kg/mm^2 で実施された疲労過程において、各所要繰返し数で一時的休止して行なわれた静的曲げ試験から得られた最大たわみ δ_{qs} および回復たわみ $\bar{\delta}_{qs}$ の疲労進行に伴う変化を Fig. 4 に示した。また $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ 温度条件下の同変化を Fig. 5 に提示した。

Fig. 4. Deflection change under the condition of $+20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Fig. 5. Deflection change under the condition of $-20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Fig. 6. Deflection change under the condition with temperature change from $+20^\circ\text{C}$ to -20°C .

Fig. 7. Deflection change under the condition with the temperature change from -20°C to $+20^\circ\text{C}$.

Fig. 8. Change of the dynamical coefficient, $D_q = \delta_q / \delta_{qs}$.

繰返し数 $q = 2.5 \times 10^4$ サイクルにおいて二種類の温度変化を与えた場合、すなわち、 $+20^\circ\text{C}$ から -20°C へ及びこの逆の場合におけるおのおののたわみ変化を Fig. 6 と 7 に示した。

また動係数 D_q の変化を Fig. 8 に一括して示した。

3.2 各ひずみエネルギーの1サイクル当たり発生量変化

上述の測定結果とべき n_q と m_q に関する解析結果を(1)式に代入して計算を行なうと、各温度条件下のそれぞれの疲労進行過程における擬似弾性ひずみエネルギー $(U)_q$ および塑性ひずみエネルギー $(E_p)_q$ の1サイクル当たり各発生量の変化を知ることができる。

Fig. 9 に $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ 条件下および $q = 2.5 \times 10^4$ サイクルにおいて $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ から $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ へ温度変化を与えた条件下における各ひずみエネルギー発生量変化に関する解析結果を示し、さらに Fig. 10 に $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ 条件下およびこの温度から $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ に変化を与えた場合における同解析結果を示した。

Fig. 9. Change of the respective mean values of $(U)_q$ and $(E_p)_q$ due to the temperature change from $+20^\circ\text{C}$ to -20°C .

Fig. 10. Change of the respective mean values of $(U)_q$ and $(E_p)_q$ due to the temperature change from -20°C to $+20^\circ\text{C}$.

3.3 各ひずみエネルギー総和の疲労進行に伴う変化

すでに解析した1サイクル当たり各ひずみエネルギー発生量を繰返し数 q に関して数値積分すると、各温度条件下における疲労進行に伴う各ひずみエネルギー総和の変化をは握することができる。これらを Fig. 11 から14の各図に示した。

Fig. 11 は $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ 条件下、Fig. 12 は $-20 \pm 2^\circ\text{C}$

Fig. 11. The respective energy summation changes caused by the fatigue test under $\sigma=20 \text{ kg/mm}^2$ and $T=+20\pm 2^\circ\text{C}$.

Fig. 12. The respective energy summation changes produced by the fatigue test under $\sigma=20 \text{ kg/mm}^2$ and $T=-20\pm 2^\circ\text{C}$.

条件下, Fig. 13 は $+20\pm 2^\circ\text{C}$ から $-20\pm 2^\circ\text{C}$ へ温度変化を与えた条件下, さらに Fig. 14 はこれと逆の温度変化を与えた条件下におけるそれぞれのひずみエネルギー総和量変化を両対数紙に図示したものである。

Fig. 11 と 12 において, 擬弾性ひずみエネルギー $\sum_{q=1}^q (U)_q$ は破断に至るまでおのおの直線で示される変化をすることから, 次式でその変化を表わすことができる。

$$\sum_{q=1}^q (U)_q = A \cdot q^\kappa \quad (4)$$

ここで A はそのエネルギーの初期値で近似的弾性エネルギーの計算で求め, q は繰返し数を示し, κ は試験片材料, 疲労試験法, およびふん囲気温度等, 実験条

Fig. 13. The respective energy summation changes caused by the fatigue test with the temperature change from $+20^\circ\text{C}$ to -20°C , and under $\sigma=20 \text{ kg/mm}^2$.

Fig. 14. The respective energy summation changes caused by the fatigue test with the temperature change from -20°C to $+20^\circ\text{C}$, and under the same stress amplitude.

件により異なり, かつ実験により決定される定数である。

本式はすでに報告した研究で得た結果と一致している。

さらに Fig. 13 と 14 の $\sum_{q=1}^q (U)_q$ の変化には温度変化を与えたことに伴う節点 P がそれぞれ現われている。

一方, 疲労進行に伴う $\sum_{q=1}^q (E_p)_q$ の変化には, Fig. 11 と 12 に示すように, 2 節点 (C , D) が現れる。さらに, Fig. 13 と 14 にも同様に 2 節点が現われ, 特に Fig. 13 には温度変化によるものと考えられる D' 節点が現われた。

これらすべての図において, 節点 C は塑性ひずみエネルギーの総和量 $\sum_{q=1}^q (E_p)_q$ が近似的に 10 kg-m に到達する繰返し数付近で現われていることが確認できる。

Fig. 11 における節点 D は同じく $\sum_{q=1}^q (E_p)_q$ が約 100 kg-m に到達する繰返し数付近で現われている。この

繰返し数がほぼ $q=2.5 \times 10^4$ サイクルであることから、本実験における温度変化、すなわち、 $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ から $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ およびこの逆の温度変化をこの繰返し数において意識的に与えた所以である。

$-20 \pm 2^\circ\text{C}$ の温度条件下で得た Fig. 12 における節点 D は $\sum_{q=1}^q (E_p)_q$ が近似的に $200 \text{ kg}\cdot\text{m}$ に到達する繰返し数付近で現われている。このエネルギー量は $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ から $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ へ温度変化を与えた後現われた Fig. 13 の D' 節点のそれと近似的に等しいことは注目に値すると思われる。また、Fig. 14 の節点 D は $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ から $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ への温度変化を与えるときただちに現われ、そのときのエネルギー量は Fig. 11 と 13 の各 D 節点エネルギー量と近似的に等しい。

これらのことは 4・1 において前論文²⁾³⁾の結果とも対比して詳述する。

3・4 組織変化と破面の観察

Fig. 15(a) は $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ 温度条件下の疲労過程における繰返し数 $q=3 \times 10^3$ サイクルにおいて、初めて二例見いだされたすべり帯のうちの一例であり、Fig. 15(c) は $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ 下、同じく $q=3 \times 10^3$ サイクルで三例見いだされたすべり帯の一例である。したがって、両温度ふん囲気下の疲労過程におけるすべり帯の発生はともに繰返し数 $q=3 \times 10^3$ 付近においてであり、Fig. 11 と 12 における節点 C の出現とおのおの関連しているものと考えられる。

(a) Slip band (at $q=10^3$ cycles, under $+20^\circ\text{C}$).
(b) Formation of the slight intrusions ($q=2 \times 10^4$, $T=+20^\circ\text{C}$).
(c) Slip band ($q=10^3$, $T=-20^\circ\text{C}$).
(d) Formation of the intrusions ($q=10^5$, $T=-20^\circ\text{C}$).

Fig. 15. Structural changes caused on the specimen surface.

さらに繰返し数が増して、 $q=2 \times 10^4$ サイクルに達すると、Fig. 15(b)にみられるような浅い intrusion が二例だけ発見された。この程度の intrusion をマイクロ・クラック（このマイクロ・クラックに関する概念規定は過去の論文⁶⁾で行なった）であると定義すれば、その発生は $q=2 \sim 2.5 \times 10^4$ サイクル付近の繰返し数においてであったと考えられる。

一方、 $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ 温度ふん囲気下の場合には、この定義によるマイクロ・クラックの発生は $q=7 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ サイクルの繰返し数範囲においてであったと推定することができる。この根拠は $q=5 \times 10^4$ で採取したレプリカからは intrusion は見いだされず、 $q=1 \times 10^5$ で採取したレプリカからは明確な intrusion の存在が、Fig. 15(d)に示すように確認されたからである。

以上のことから、これら intrusion またはマイクロ・クラックの発生は Fig. 11 と 12 における節点 D の出現と関連あるものと考えられ、このことおよび前述の C 節点とすべり帯発生とが関連することは前論文²⁾³⁾の結論と一致している。

Fig. 16 に各温度条件下の破面写真を示す。写真(a)と(e)は $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、(b)と(f)は -20°C から $+20^\circ\text{C}$ へ温度変化が与えられた場合、(c)と(g)はこれと逆の温度変化を与えた場合、および(d)と(h)は $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ の各温度条件下の各破面中心近傍の特徴を示すための電子顕微鏡写真例である。

これらの写真および他の多くの観察から推定できた事柄は次の二件であった。まず $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ 下および -20°C から $+20^\circ\text{C}$ へ温度変化を与えた条件下の破面中央部の特徴は striation と tire track 等の疲労型模様、多数の延性型模様、たとえば写真(a)のような dimple pattern が認められ、ついで $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ 下および $+20^\circ\text{C}$ から -20°C へ温度変化の与えられた条件下における同特徴は疲労型を含まない延性型模様が多数観察され延性型模様は少なかった。したがって変化後のふん囲気温度に依存した特徴が破面に認められた。

4 考 察

4・1 節点についての検討

疲労進行に伴う塑性ひずみエネルギー総和量の変化に現われた節点について検討する。

$\sigma=20 \text{ kg}/\text{mm}^2$ の応力振幅で行なわれた本実験の場合、前論文²⁾³⁾で報告した第1節点（非弾性応答開始繰返し数に対応）と第2節点（微細すべり線発生繰返し数に対応）に関する検討はできない。

まず、C 節点の現われるエネルギー量は $\sum_{q=1}^q (E_p)_{q=2)3)}$ $q=$ $10 \text{ kg}\cdot\text{m}$ であり、本実験の場合のみならず前論文で取り扱った2種類の炭素鋼によるおのおの2応力振幅下のいずれの実験結果とも一致し、かつすべり帯の発生もこの節点の現われる繰返し数付近でいずれの場合も

(a) and (e) were obtained from a fracture surface caused by the test under $T=+20^{\circ}\text{C}$ and at $q=1.64 \times 10^6$ cycles.
 (b) and (f) were obtained from a fracture surface produced at $q=2.03 \times 10^6$, and under the temperature condition ($-20^{\circ}\text{C} \rightarrow +20^{\circ}\text{C}$).
 (c) and (g): at $q=4.28 \times 10^6$, under ($+20^{\circ}\text{C} \rightarrow -20^{\circ}\text{C}$).
 (d) and (h): at $q=4.7 \times 10^6$, under (-20°C constant).

Fig. 16. Fractographs collected in the vicinity of the central portion on the respective fracture surfaces.

確認された。したがって、疲労によるすべり帯の形成には応力振幅やふん囲気温度によって変わらないエネルギー限界があるらしいことが判明した。

つぎに、D 節点の現われたときのエネルギー量を調査した結果、次のことがわかった。すなわち $-20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 温度条件下では $\sum_{q=1}^q (E_p)_q = 200 \text{ kg-m}$ に到達する繰返し数付近で D 節点の現われた。このエネルギー量は前論文の応力振幅 $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$ と 19 kg/mm^2 による室温下の両疲労過程におけるそれぞれの第 4 節点エネルギー量に一致し、さらに intrusion の発生といずれの場

合も関連していることは特記すべき事実であらうと考えられる。しかるに本実験の $+20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 温度ふん囲気下で実施した応力振幅 20 kg/mm^2 の場合、D 節点のエネルギー量は Fig. 11 から約 100 kg-m であることがわかり、他の場合と一致していない。このことは次の理由によるものと考えられる。すなわちこの場合における試験片の試験部分は疲労進行に伴いわずに変色し、発熱を起こしていることから、塑性ひずみエネルギーの一部が熱エネルギーに変換して試験片の温度を高め、さらにその熱エネルギーは冷却作用のため周辺気体に放散

したり、伝導現象によりチャック等に逃げたものと考えられ、このため他の場合のエネルギー量との間に不一致を生じたものと考えられる。なお、この場合においてもD節点の出現する繰返し数付近で intrusion の発生が確認された。上述の塑性ひずみエネルギーの熱エネルギーへの変換およびその移動や放散についてはすでに過去の論文^{7,8)}で取り扱っている。

Fig.14におけるD節点は -20°C から $+20^{\circ}\text{C}$ へ温度変化が与えられた直後の繰返し数付近で、約 $100\text{ kg}\cdot\text{m}$ のエネルギー量に達したとき現われ、Fig.13では $+20^{\circ}\text{C}$ から -20°C に温度変化が与えられた後、エネルギー量が $200\text{ kg}\cdot\text{m}$ に達する繰返し数付近で D' 節点が見われた。

以上のことから、intrusion またはマイクロ・クラックの発生にはエネルギー限界があるらしいことおよび応力振幅がある限界を越えるとそのエネルギー限界は低下するものと考えられる。

4・2 疲労寿命の予知に関する検討

疲労進行に伴う擬似弾性ひずみエネルギー総和^{2,5)}の変化は近似的に(4)式で表わされると述べたが、以前の論文においてもすでに同式を得て、疲労寿命の推定や予知に使用可能であると述べてきた。

そこで、ここでは $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 温度条件下の実験結果を(4)式により整理して、その整理した結果を用いて他の3温度条件、すなわち $-20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $+20^{\circ}\text{C}$ から -20°C へ温度変化を与えた場合およびこれと逆の温度変化を与えた場合の各温度条件下におけるそれぞれの疲労寿命の推定が可能かどうかを検討する。

まず、(4)式を変形して、4温度条件下の各試験片破断時の擬似弾性ひずみエネルギー総和量をそれぞれ次式で表わす。

$$\sum_{q=1}^N (U)_q = A_1 \cdot N^{\kappa_1} \cdot F(+20^{\circ}) \quad (+20\pm 2^{\circ}\text{C温度条件}) \quad (5)$$

$$\sum_{q=1}^N (U)_q = A_2 \cdot N^{\kappa_2} \cdot F(-20^{\circ}) \quad (-20\pm 2^{\circ}\text{C温度条件}) \quad (6)$$

$$\sum_{q=1}^N (U)_q = A_1 \cdot q_1^{\kappa_1} \cdot F(+20^{\circ}) + A_2 (N - q_1)^{\kappa_2} \cdot F(-20^{\circ})$$

$$(q_1 \text{ で } +20^{\circ}\text{C} \text{ から } -20^{\circ}\text{C} \text{ へ温度変化を与えた条件}) \quad (7)$$

$$\sum_{q=1}^N (U)_q = A_2 \cdot q_2^{\kappa_2} \cdot F(-20^{\circ}) + A_1 (N - q_2)^{\kappa_1} \cdot F(+20^{\circ})$$

$$(q_2 \text{ で } -20^{\circ}\text{C} \text{ から } +20^{\circ}\text{C} \text{ へ温度変化を与えた条件}) \quad (8)$$

ここで A_1 と A_2 はそれぞれ $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ と $-20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の各温度条件下のそれぞれのエネルギー初期値、 κ_1 と κ_2 は同じく各温度条件下の実験で定まるおのの定数、 $F(+20^{\circ})$ は $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の温度条件で定まる係数、

$F(-20^{\circ})$ は同じく $-20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の温度条件で定まる係数、 N は各場合における試験片の破断繰返し数、 q_1 と q_2 はおのの温度変化を与えたときの繰返し数である。

つぎに、 $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 下の実験データの整理結果を基準にとるため、上式において、 $A_1 = A_2 \equiv A$ 、 $\kappa_1 = \kappa_2 \equiv \kappa$ とおき、 $q_1 = q_2 = 2.5 \times 10^4$ サイクルであることに注意して、Fig. 11 から $A = 14.2\text{ kg}\cdot\text{mm}$ 、 $\kappa = 1.033$ を得、さらに $F(+20^{\circ}) \equiv 1$ とおいて Fig. 12 との比較から $F(-20^{\circ}) \equiv 0.8674$ を定めることができる。

そして、上の各式にこれらの各値と各場合における N を代入して、それぞれの試験片破断時の擬似弾性ひずみエネルギー総和量 $\cdot \sum_{q=1}^N (U)_q$ を算出し、実験値と比較すると Table III に示される程度の近似が得られた。

Table III. Experimental and calculated values of $\sum_{q=1}^N (U)_q$.

Condition of temperature	Number of cycles	Experimental value (kg-m)	Calculated value (kg-m)
20°C	1.70×10^5	3.0×10^8	3.0×10^8
	1.60×10^5	3.1×10^8	2.9×10^8
	1.59×10^5	2.8×10^8	2.8×10^8
-20°C	4.71×10^6	8.0×10^4	7.9×10^4
	3.99×10^6	6.55×10^4	6.74×10^4
	4.70×10^6	7.9×10^4	7.9×10^4
$20^{\circ}\text{C} \rightarrow -20^{\circ}\text{C}$	4.30×10^6	7.5×10^4	7.32×10^4
	4.28×10^6	7.4×10^4	7.27×10^4
$-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$	2.03×10^5	4.2×10^8	3.51×10^8
	1.63×10^5	2.95×10^8	2.78×10^8

したがって、 $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 下の整理結果を用い、他の温度条件下の試験片破断時の擬似弾性ひずみエネルギー総和量が近似的に推定できるから、逆に各条件下の試験片破断繰返し数を上式により近似的に推定または予知可能であると考えられる。しかしこの推定には多くの実験的統計量を必要とする。

5 結 論

以上の実験結果と考察から次の結論が得られる。

(1) 疲労過程における $+20^{\circ}\text{C}$ から -20°C への温度変化およびこれと逆の温度変化を含むふん囲気温度条件はひずみエネルギー変化と鋼の疲労寿命等の疲労現象に大きな影響を及ぼす。

(2) 疲労進行に伴う擬似弾性ひずみエネルギー総和量の変化を表わす(4)式を使用して、一段温度変化を加えられた疲労過程におけるそれぞれの疲労寿命を近似的に推定できる。

(3) 塑性ひずみエネルギー総和量を繰返し数に対して

両対数紙にプロットすると, いずれのふん囲気温度条件下でも, まず $\sum_{q=1}^q (E_p)_q \approx 10 \text{ kg-m}$ となる繰返し数付近ですべり帯発生と関連をもったC節点が現われ, ついでD節点が intrusion の発生する繰返し数付近で現われた. したがって, すべり帯と intrusion のおのおの発生には蓄積エネルギーの限界値が存在するらしいことがわかった. ただし後者のそれは応力振幅がある限界を越え, かつ室温下の場合, 低下するものと考えられる.

(4) 破断面中心近傍には変化後のふん囲気温度に依存した特徴, すなわち, $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ 温度条件下および -20°C から $+20^\circ\text{C}$ へ温度変化を与えた条件下の両破面の中心近傍には疲労型の模様の他, 多数の延性型模様が見いだされ, 一方 $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ 条件下および $+20^\circ\text{C}$ から -20°C へ温度変化が与えられた条件下の両破面中心近傍には延性型模様は非常に少なく, 疲労型模様を含むぜい性型模様を多数見いだすことができた.

本研究の実施にあたり, ご教示とご激励を賜った, 北海道大学教授, 土肥 修, 秦 謹一, 関 信弘ならびに長岡金吾の各先生, さらに防衛大学校機械工学科の諸先生方に対し, ここに筆者等は深甚なる感謝の意を表します. また実験に協力願った, 当時防大学生,

伊藤勝美ならびに平野正敏両君に対し心から謝意を呈します.

(昭和47年5月29日 日本材料学会第21期総会学術講演会; 昭和47年8月25日 第16回材料研究連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Aoki, N., and C. Minamisawa, Proc. 13th Japan Congr. on Materials Research, 82 (1970).
- 2) 南澤 力, 青木 望, 芳賀 武, 石田有示, 材料, **21**, 90 (1972); British Iron and Steel Industry Translation Service, [10562] (Sept. 1972).
- 3) Minamisawa, C., N. Aoki, T. Haga, and Y. Ishi-Da, Proc. 15th Japan Congr. on Materials Research, 22 (1972).
- 4) 南澤 力, 青木 望, 荻部忠雄, 材料科学, **8-3**, 31 (1971).
- 5) Minamisawa, C., N. Aoki, and T. Sasabe, Proc. 15th Japan Congr. on Materials Research, 27 (1972).
- 6) 南澤 力, 青木 望, 材料, **15**, 785 (1966).
- 7) 南澤 力, 青木 望, 荻部忠雄, 材料科学, **8-4**, 72 (1971).
- 8) Minamisawa, C., N. Aoki, and T. Sasabe, Proc. 15th Japan Congr. on Materials Research, 95 (1972).