

# 高分子材料および軟鋼の低温疲れに関する光弾性的研究

三 木 教\*・石 田 武\*

## Photoelastic Studies on the Fatigue-Behavior in Low Temperature

Satoshi MIKI and Takeshi ISHIDA

### Abstract

Fatigue-behaviors under a repeated tensile stress in low temperature ( $20^{\circ}\text{C}\sim-100^{\circ}\text{C}$ ) on flat specimens of high polymers and mild steel were investigated with the photoelastic method.

By this method, fatigue occurrence, fatigue progress, fatigue crack propagation and stress and strain distributions in the neighbourhood of the fatigue crack were investigated.

Dynamical birefringent patterns were photographed with the synchronous method by a strobo apparatus continuously during the fatigue test.

### 1. 結 言

高分子および金属の疲れ挙動について、著者三木<sup>1)~5)</sup>はその光弾性的研究を既にしばしば報告しているが、本文は鎖状ポリマーのセルロイド、網状ポリマーの混合ポリエステルおよび軟鋼の帯板試片について、常温より $-100^{\circ}\text{C}$ までの低温領域で繰返し引張応力を作用せしめ、その疲れ破壊機構を光弾性的方法を用いて連続的に調べたもので、この方法によって、繰返し応力過程における疲れおよび疲れ亀裂の発生と進行、疲れ亀裂進行中の亀裂近傍における応力分布などを解明した結果について述べたものである。

### 2. 実験材料および実験方法

実験に使用したセルロイドは、厚さ3mmの市販の板より平行部巾10(6)mm、平行部長60mmに加工したものを、ポリエステルは二重結合の量の異なる2種のポリエステルを重量比5対5の割合で重合硬化した厚さ5mmの5-5混合ポリエステル(以後、5-5 MPE という)板から、平行部巾8mmに加工して用いた。

軟鋼は厚さ0.5mmの一般構造用圧延鋼材SS41Pを用いたが、これを圧延方向に板取りし、平行部巾6(5)mm、平行部長30mmに加工して、その後、残留

応力除去のために $500^{\circ}\text{C}$ の塩浴中で1時間焼鈍し、徐冷して試片とした。また、光弾性皮膜としては厚さ1mmのエポキシ・ポリサルファイド・アミンを用いたが、その主ひずみ感度( $\beta$ )は $20^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$ で $1.37\text{mm}^{-1}$ 、 $-60^{\circ}\text{C}$ で $1.23\text{mm}^{-1}$ となった。

また、実験はフロンガスを用いた三元空気低温槽内に試片を入れ、外部から一定の繰返し引張荷重を作用さすようにしたが、セルロイドでは、その雰囲気温度を常温( $20^{\circ}\text{C}$ )、 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $-25^{\circ}\text{C}$ 、 $-50^{\circ}\text{C}$ および $-100^{\circ}\text{C}$ とし、毎分繰返し数600回で行い、5-5 MPEは、常温および $-50^{\circ}\text{C}$ において毎分1200回の繰返し数で、また、軟鋼試片の場合は常温、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $-60^{\circ}\text{C}$ および $-100^{\circ}\text{C}$ で毎分1200回の繰返し数で行った。また、写真撮影はストロボスコープで同期させて、モータードライブ付きカメラにより連続的に行った。

なお、実験中の試片の温度上昇は、重さ約0.8gの銅-コンスタンタンの熱電対およびサーモペイントにより測定し、疲れひずみは顕微望遠鏡およびカセットメータにより測定した。

### 3. ポリマーの低温繰返し引張疲れの光弾性的解析

#### 3.1 静引張特性

各低温雰囲気中におけるセルロイドの応力~ひずみ特性をFig. 1に、応力~複屈折(しま次数)特性をFig. 2に、さらに、低温における静機械的特性および

\* 生産機械工学科

複屈折特性を Fig. 3, Fig. 4 に示したが, セルロイドでは低温になるほど脆くなり,  $-100^{\circ}\text{C}$  になると常温よりも, 比例限および引張強さは3~5倍も増加しているが, 伸び率は逆に約1/8となった。また,  $\sigma \sim \epsilon$  関係の比例限応力よりも  $\sigma \sim N$  関係の比例限応力の方が各温度とも約2倍大きくなった。また複屈折効果(光弾性感度  $\alpha$ )は  $-100^{\circ}\text{C}$  では常温の約1/2に, ヤング率は逆に約2倍になった。

5-5 MPE を低温雰囲気中で引張実験した際の応力~ひずみ特性, 応力~複屈折特性をそれぞれ, Fig. 5, Fig. 6 に示したが,  $-50^{\circ}\text{C}$  では  $20^{\circ}\text{C}$  よりも引張強さが約1.5倍に, 伸び率が約1/3となった。また,  $20^{\circ}\text{C}$  においては, 静引張時に応力が約  $3\text{kg/mm}^2$  以上になると, 複屈折は逆転し, 減少して破断したが,  $-50^{\circ}\text{C}$  では, 破断までほぼ直線的に変化した。なお,  $20^{\circ}\text{C}$  での光弾性感度は  $0.32\text{mm/kg}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$  では  $0.30\text{mm/}$

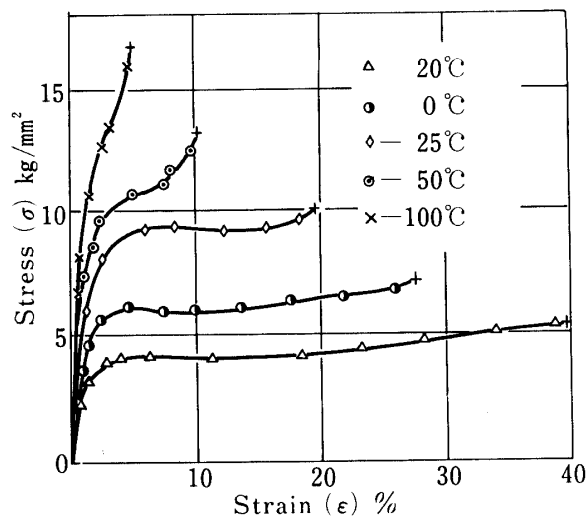


Fig. 1 Stress ~ Strain diagram of Celluloid ( $\dot{\epsilon}=0.04/\text{min}$ )

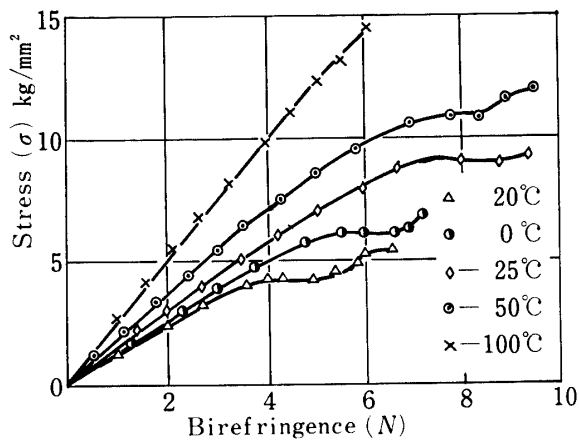


Fig. 2 Relation between stress and birefringence of Celluloid ( $\dot{\epsilon}=0.04/\text{min}$ )

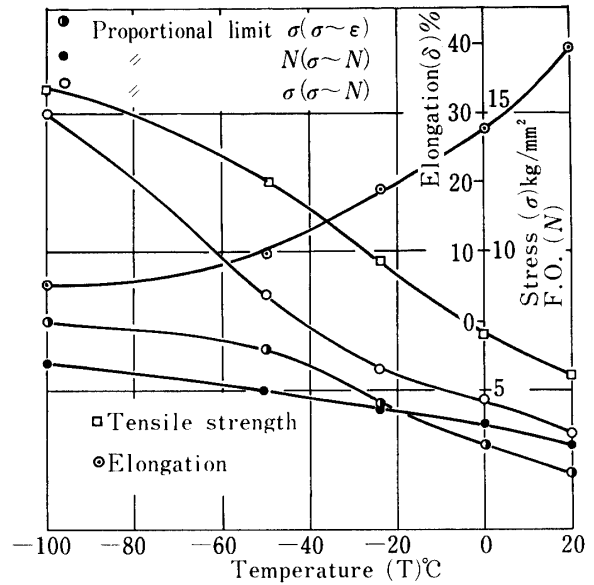


Fig. 3 Relation between mechanical properties and birefringent effect of Celluloid and temperature

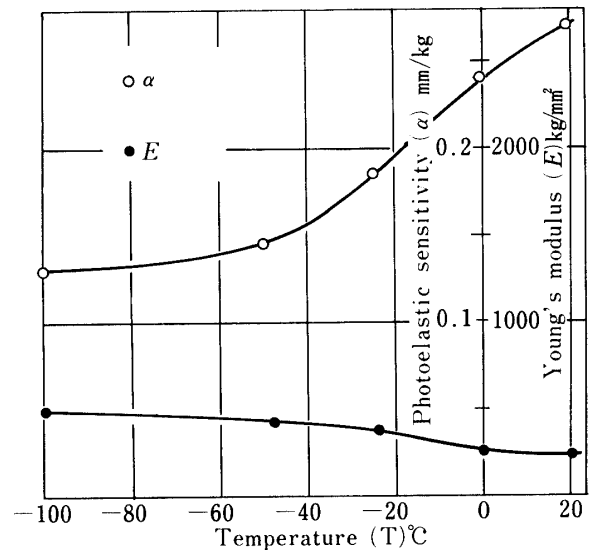


Fig. 4 Relation between birefringent effect and Young's modulus of Celluloid and temperature

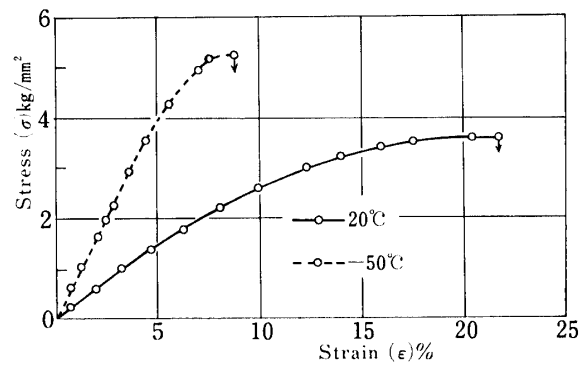


Fig. 5 Stress ~ Strain diagram of 5-5MPE ( $\dot{\epsilon}=0.04/\text{min}$ )

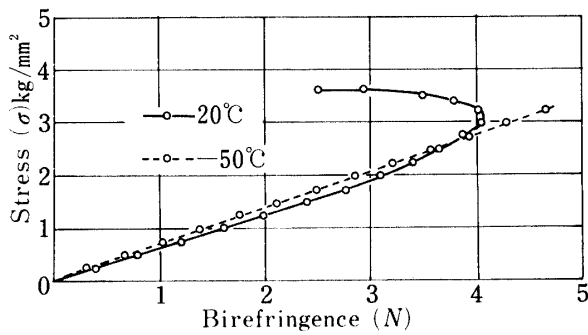


Fig. 6 Relation between stress and birefringence of 5-5MPE ( $\dot{\epsilon}=0.04/\text{min}$ )

kgであった。

### 3.2 セルロイドの低温引張疲れ破壊挙動の解析

#### 3.2.1 セルロイドの低温引張疲れ破壊挙動の光弾性写真

本実験で得られたセルロイドの低温疲れ破壊挙動の光弾性写真の一例を、雰囲気温度が 20°C, 0°C および -25°C の各場合について Figs. 7~10 に示した。ここで、20°C の場合は繰返し数が485,574回で先ず、疲れの発生を認め、さらに繰返し数が増して576,631

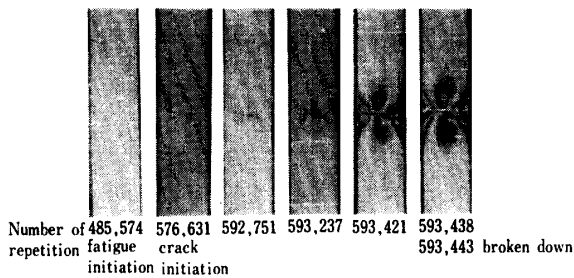


Fig. 7 Birefringent patterns in the neighbourhood of the propagating fatigue crack under the repeated tensile stress ( $\sigma$ ) in a Celluloid flat specimen (20°C, 10Hz,  $\sigma=2.4\text{kg}/\text{mm}^2$ )

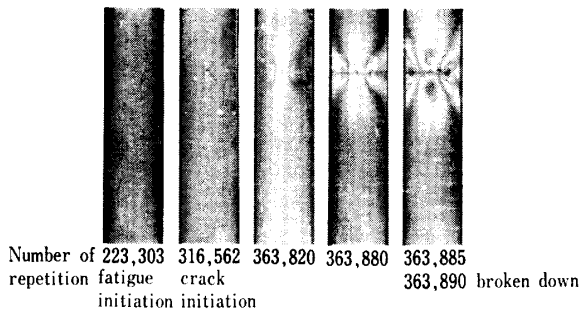


Fig. 8 Birefringent patterns in the neighbourhood of the propagating fatigue crack under the repeated tensile stress ( $\sigma$ ) in a Celluloid flat specimen (0°C, 10Hz,  $\sigma=3.1\text{kg}/\text{mm}^2$ )

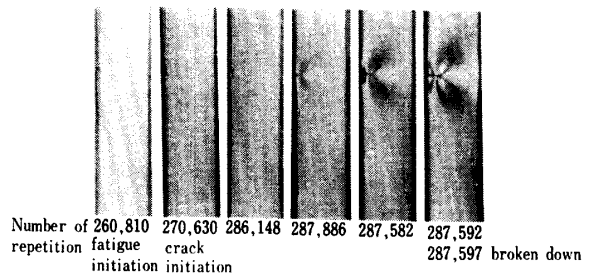


Fig. 9 Birefringent patterns in the neighbourhood of the propagating fatigue crack under the repeated tensile stress ( $\sigma$ ) in a Celluloid flat specimen (0°C, 10Hz,  $\sigma=2.9\text{kg}/\text{mm}^2$ )

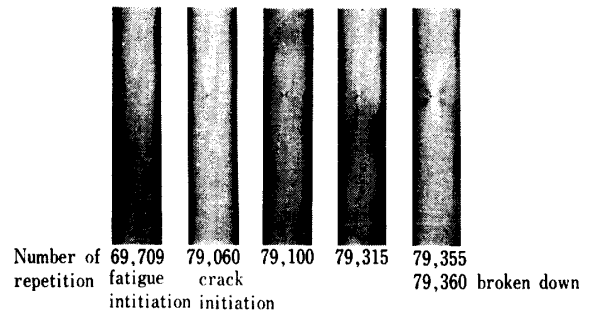


Fig. 10 Birefringent patterns in the neighbourhood of the propagating fatigue crack under the repeated tensile stress ( $\sigma$ ) in a Celluloid flat specimen (-25°C, 10Hz,  $\sigma=4.5\text{kg}/\text{mm}^2$ )

回で亀裂の発生を認めたが、この時は全寿命の約97%であった。その後、亀裂が成長して、593,443回で破断した。0°C の場合も常温と同様な傾向で疲れ破壊しているが、常温の場合よりも亀裂長さが短い状態で破断した。-25°C の場合は、繰返し数79,060 (全寿命の約99.6%) で亀裂の発生を認め、その亀裂がほとんど成長しない間に破断 (793.360) しているが、-50°C, -100°C ではさらに早く、亀裂を認めることなく破断した。

なお常温では、試片の内部から疲れ亀裂が発生することが多かったが、低温になるに従って自由周辺から亀裂が発生して破断することが増加した。

**3.2.2 セルロイドの疲れの発生、進行および亀裂の生成** 常温における疲れ実験では、繰返し応力が大きく、かつ、 $10^4$  回以下の繰返し数で破断した場合は試片の温度は上昇して40°C に達し、また、0°C の場合でも応力が大きく $10^5$  回以下で破断した場合は40°C に達したが、その他の場合は温度上昇はほとんど認められなかった。さらに、-25°C 以下の温度では試片に発熱を生じて、周囲の雰囲気温度が低く、その熱が直ちに発散してしまうものと考えられ、試片の温度上昇は認められなかった。

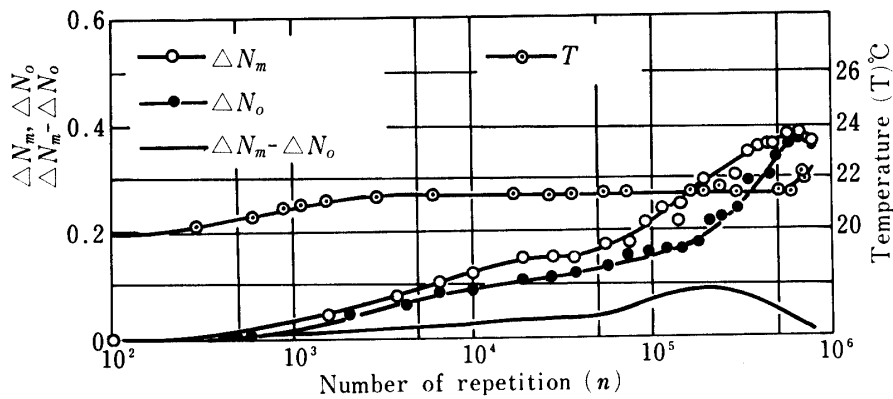


Fig. 11 Variations of birefringence in the upper limit ( $\Delta N_m$ ) and the lower limit ( $\Delta N_o$ ) under the repeated tensile stress of Celluloid ( $20^\circ\text{C}$ ,  $\sigma=2.5\text{kg/mm}^2$ )

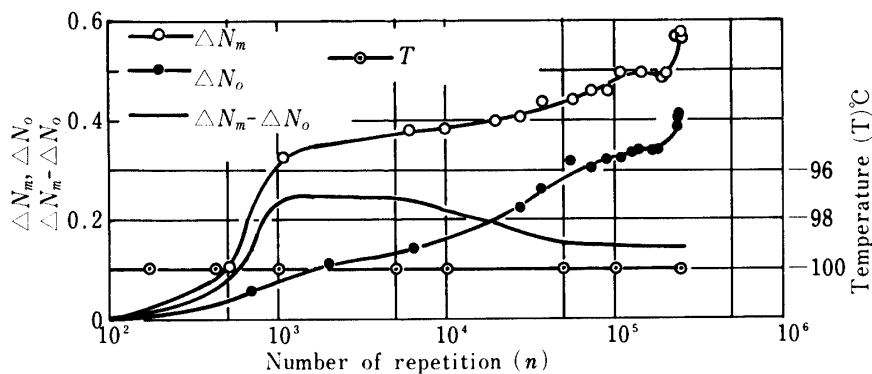


Fig. 12 Variations of birefringence in the upper limit ( $\Delta N_m$ ) and the lower limit ( $\Delta N_o$ ) under the repeated tensile stress of Celluloid ( $-100^\circ\text{C}$ ,  $\sigma=7.6\text{ kg/mm}^2$ )

疲れ実験中の疲れ部分における最大応力時と最小応力時 ( $\sigma=0$ ) の複屈折 (しま次数  $N$ ) の変化分 ( $\Delta N_m$ ,  $\Delta N_o=N_o$ ) およびそれらの差 ( $\Delta N_m - \Delta N_o = \Delta N_m - N_o$ ) ならびに試片温度の繰返し数による変化を、雰囲気温度が  $20^\circ\text{C}$ ,  $-100^\circ\text{C}$  の場合について Fig. 11, Fig. 12 に示した。これらによると、 $20^\circ\text{C}$  の場合も  $-100^\circ\text{C}$  の場合も、いずれも疲れ残留複屈折 ( $\Delta N_o$ ) は疲れの進行とともに破断に到るまで増大するが、それらの差 ( $\Delta N_m - \Delta N_o$ ) は繰返しとともに増大して極大となった後に減少して、亀裂が発生し破断した。すなわち、疲れにより、繰返し応力による動的光弾性効果は増大して極大となった後、減少して破断することがわかった。

( $\Delta N_m - \Delta N_o$ ) が減少してから疲れ亀裂が発生するが、その亀裂先端の複屈折 (しま次数) と亀裂成長速度について調べたのが Fig. 13 である。横軸には亀裂発生後の複屈折の変化 ( $N - N_c$ )、縦軸には単位巾の試片の亀裂成長速度をとった。これらの曲線の式は図に示した如く、

$$v = k(N - N_c)^m \equiv k(\Delta N)^m$$

$k, m : \text{const.}$

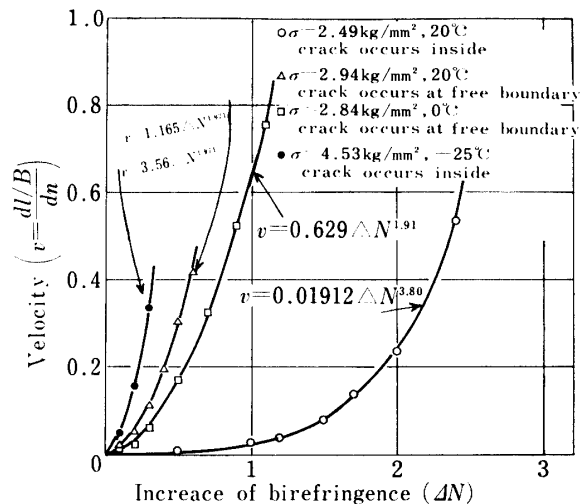


Fig. 13 Relation between the velocity and birefringence at the top of propagating fatigue crack under the repeated tensile stress in a Celluloid flat specimen

$N$  : 最大引張時の亀裂先端の複屈折。  
 $N_c$  : 亀裂発生直前の最大引張複屈折。  
 とかける。また、セルロイドでは

$$N \propto \sigma$$

なる故に、

$$v = K(\sigma - \sigma_c)^m \equiv K(\Delta\sigma)^m$$

$K$ : const.

$\sigma$ : 最大引張時の亀裂先端の応力.

$\sigma_c$ : 亀裂発生直前の最大引張応力.

となる. すなわち、亀裂成長速度は亀裂先端応力の増分の累乗に比例する.

また、Fig. 13 より、常温の場合で比較すると、亀裂が自由周辺から発生したときの方が内部から発生したときよりも、亀裂先端の応力が等しい場合でも亀裂成長速度は大きくなった.

**3.2.3 セルロイドの低温引張疲れ強度** 常温より  $-100^\circ\text{C}$  に到るまでの低温領域において、セルロイドの引張疲れ実験を行ったが、その  $S \sim n$  特性を Fig. 14 に示した. これより明らかなように、繰返し数  $10^6$  回までは各温度の特性ともほぼ直線となり、その傾きは低温になってもほぼ一定であった. また、Fig. 15 か

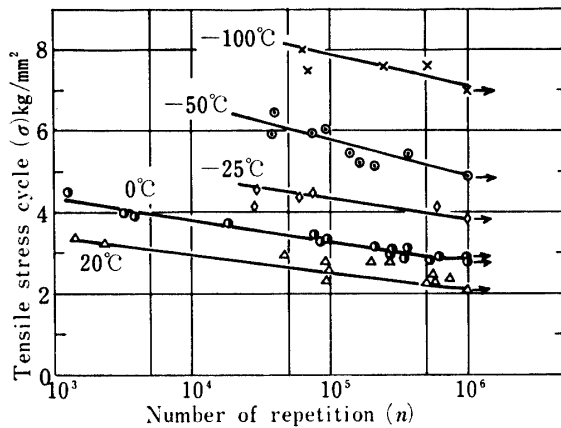


Fig. 14  $S \sim n$  diagram of Celluloid (10Hz)

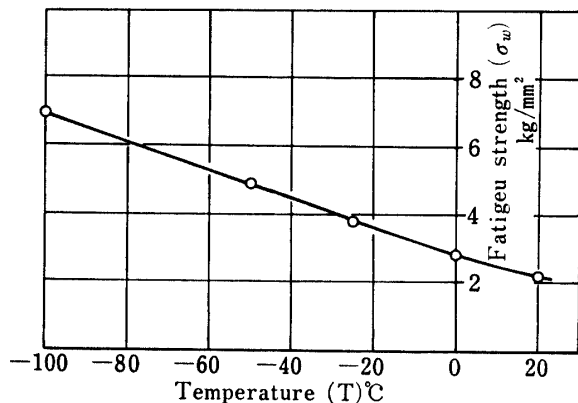


Fig. 15 Relation between the fatigue strength at the number of repetition  $10^6$  of Celluloid and the temperature under the repeated tensile stress

らもわかるように、繰返し数  $10^6$  での強度は常温で約  $2\text{kg/mm}^2$ 、 $-100^\circ\text{C}$  で約  $7\text{kg/mm}^2$  となり、 $-100^\circ\text{C}$  では常温の 3.5 倍となっているが、その間の変化状態はほぼ直線的となった.

**3.3 5-5MPE の低温引張疲れ破壊挙動の解析**

5-5 MPE の帯板試片で  $20^\circ\text{C}$  および  $-50^\circ\text{C}$  の低温雰囲気中で引張疲れ実験を行ったが、その際の疲れ光弾性写真の一例として、Fig. 16 に  $20^\circ\text{C}$  の場合を、また Fig. 17 には  $-50^\circ\text{C}$  の場合を示した.  $20^\circ\text{C}$  の場合は先ず、試片の温度がわずかではあるが上昇する

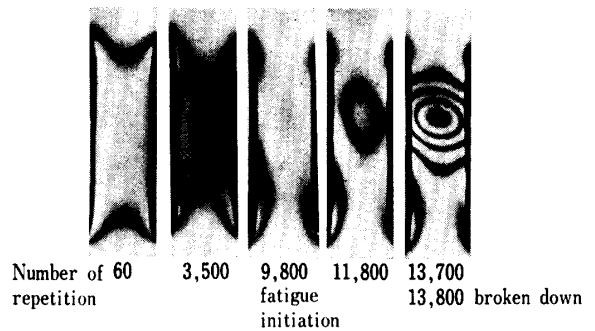


Fig. 16 Birefringent patterns of the progressing fatigue under the repeated tensile stress ( $\sigma$ ) in the flat specimen of 5-5MPE ( $20^\circ\text{C}$ ,  $20\text{Hz}$ ,  $\sigma = 1.1\text{ kg/mm}^2$ )

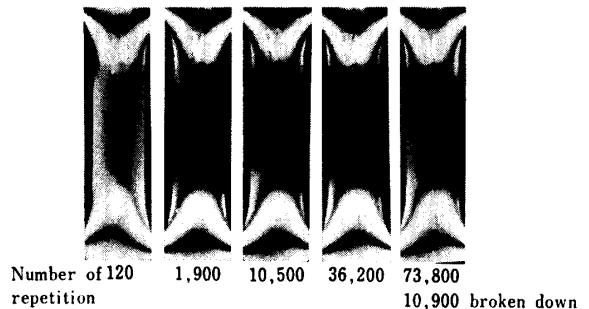


Fig. 17 Birefringent patterns of the progressing fatigue under the repeated tensile stress ( $\sigma$ ) in the flat specimen of 5-5MPE ( $-50^\circ\text{C}$ ,  $20\text{Hz}$ ,  $1.7\text{ kg/mm}^2$ )

ために、試片全域にわたって変化が生じ、繰返し数 9,800回で局部的に疲れの発生が認められ、やがて複屈折しまが円弧状となって、その中央部より13,800回で亀裂が発生し、それと同時に破断したが、これは材料が三次元網状構造のために弾性的で脆いためと考えられる.  $-50^\circ\text{C}$  の場合は Fig. 17 に示したように、試片の発熱よりも放熱の能力の方が大きいため温度は上昇せず、また、常温よりもさらに脆くなるために、局

部疲れの発生と亀裂の発生が同時におこり、その直後に破断した。

Fig. 18 は 5-5 MPE の疲れ部の複屈折効果（光弾性効果  $\alpha$ ）の繰返しによる変化を示したものであるが、これからもわかるように、20°C の場合は複屈折効果が繰返しによって減少して破断しているが、これは繰返し応力が大きいほど破断までの変化は著しく、また、-50°C ではほとんど変化が認められずに破断した。なお、振動のみによる動的光弾性感度は 20°C で 0.45mm/kg であったが、-50°C では 0.39mm/kg と低下した。

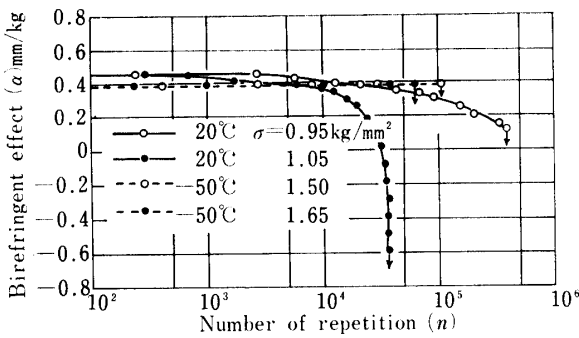


Fig. 18 Relation between number of repetition and birefringent effect of 5-5MPE

5-5 MPE の 20°C および -50°C での S~n 特性を示したのが Fig. 19 であるが、繰返し数 10<sup>6</sup> での強度は 20°C で約 0.8kg/mm<sup>2</sup>、-50°C では約 1.4kg/mm<sup>2</sup> となり、20°C の約 2 倍となった。また、どちらも静的強度の約 1/4 となった。

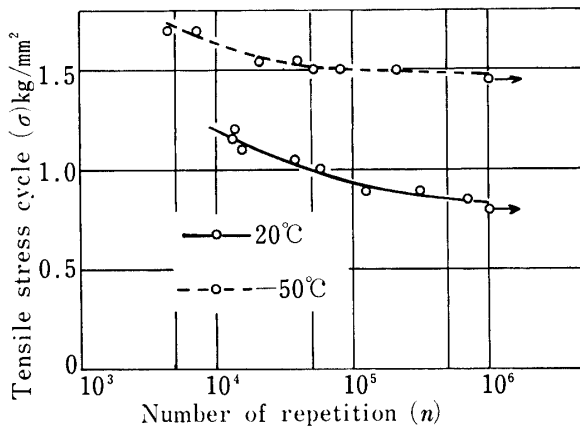


Fig. 19 S~n diagram of 5-5MPE (20Hz)

#### 4. 軟鋼の低温繰返し引張疲れの光弾性的解析

##### 4.1 静引張特性

疲れ実験を始める前に各低温雰囲気中で静引張実験

を行い、その結果を Fig. 20, Fig. 21 に、また数種の機械的性質の温度変化を Fig. 22 に示した。

Fig. 20 は光弾性皮膜を接着する前の試片での応力~ひずみ特性であるが、まず、低温になるに従って強くなり、伸びは減少しているのがわかる。そして、上下両降伏点の差が増大し、下降伏点での伸びが増し、さらに、加工硬化性が低下して、-100°C では加工硬化現象は全く認められずに上降伏点が最大応力となった。上下両降伏点の差は 20°C で約 1.5 kg/mm<sup>2</sup>、-100°C では約 5kg/mm<sup>2</sup> となり、下降伏点での伸びは常温で約 6%、-100°C では破断直前までの約 30% となった。

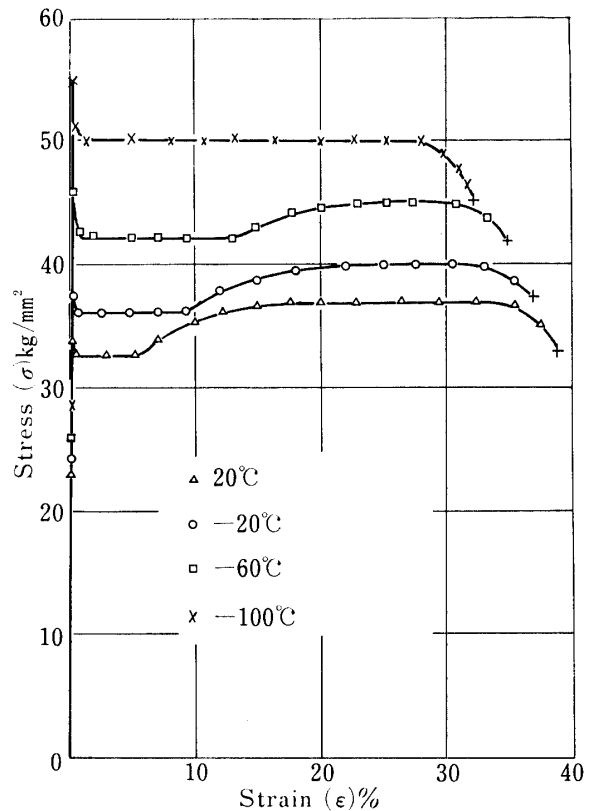


Fig. 20 Stress~Strain diagram of mild steel

Fig. 21 には光弾性皮膜を接着する前と接着後の低温での応力~ひずみ特性を、ひずみ 1% までを拡大して示したが、これより明らかなように、温度の変化および光弾性皮膜の接着によってもヤング率にほとんど変化は認められず、比例限も皮膜の接着により変化はなかった。しかし、皮膜接着後は上下両降伏点が明瞭に現われず、それ故、Fig. 22 の皮膜接着試片の降伏点は 0.2% の残留ひずみを生じる応力とした。

Fig. 22 によると、比例限は常温で約 30kg/mm<sup>2</sup>、-100°C で約 41kg/mm<sup>2</sup> と温度の下降に伴い、ほぼ直線的に増大したが、上下両降伏点は -60°C から増

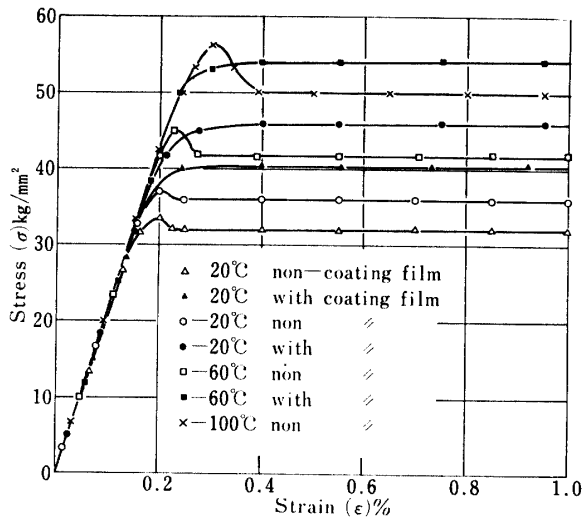


Fig. 21 Stress~Strain diagram of mild steel specimens coated photoelastic film or not

加率が増した。また引張強さについては、皮膜接着前は  $-60^{\circ}\text{C}$  以下では上降伏点と同一に、接着後は  $-20^{\circ}\text{C}$  以下で降伏点と同一になった。なお、伸びは常温で約38%となり、温度とともにほぼ直線的に減少して  $-100^{\circ}\text{C}$  では約32%となった。

#### 4.2 低温引張疲れ強度

各低温雰囲気中における毎分1200回の繰返し数での疲れ実験で Fig. 23 のような  $S\sim n$  特性を得た。これによると、皮膜を接着する前の試片の疲れ限は  $20^{\circ}\text{C}$  で約  $19\text{kg/mm}^2$ 、 $-60^{\circ}\text{C}$  で約  $30\text{kg/mm}^2$ 、 $-100^{\circ}\text{C}$  で

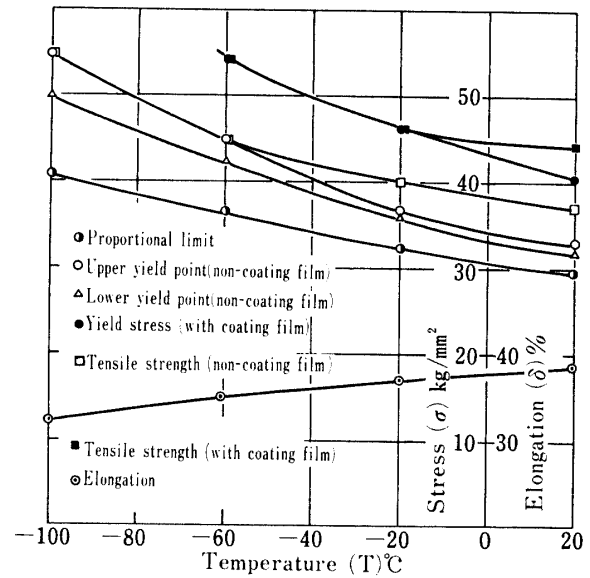


Fig. 22 Mechanical properties of mild steel in low temperature

は約  $41\text{kg/mm}^2$  となったが、皮膜接着により、 $20^{\circ}\text{C}$  で約  $3\text{kg/mm}^2$ 、 $-60^{\circ}\text{C}$  で約  $8\text{kg/mm}^2$  高くなった。また、低温になるに従い、繰返し数に対する直線の傾きは緩やかになったが、この傾向は皮膜接着試片において顕著に認められた。さらに、低温になるに従い、疲れ限に移行する際の二直線の折点も繰返し数が小さい方へ移り、皮膜接着前では  $20^{\circ}\text{C}$  において約  $4 \times 10^6$  であったのが、 $-100^{\circ}\text{C}$  では約  $8 \times 10^5$  に、皮膜接着試片では  $20^{\circ}\text{C}$  で約  $6 \times 10^6$  であったのが  $-60^{\circ}\text{C}$  では

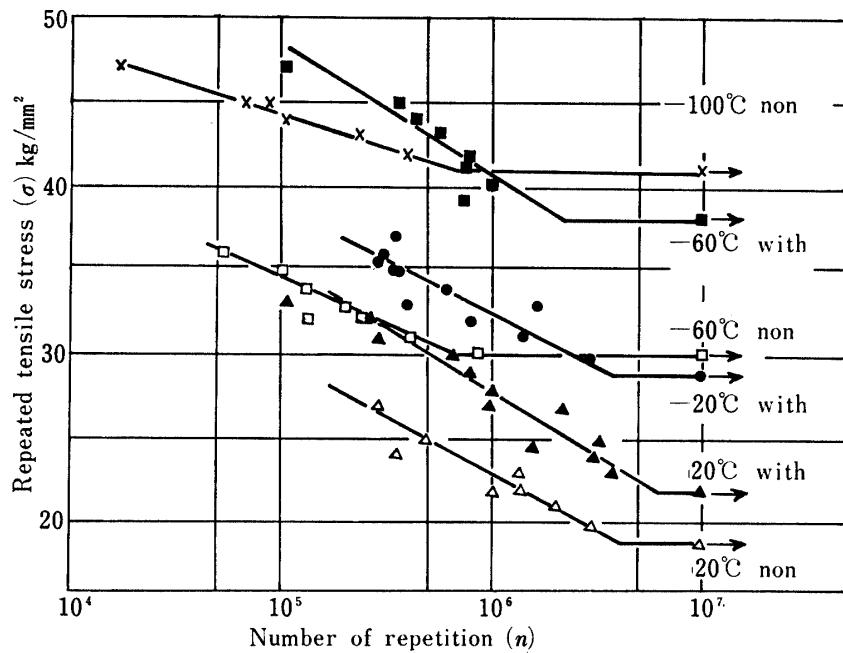


Fig. 23  $S\sim n$  curves of mild steel in low temperature

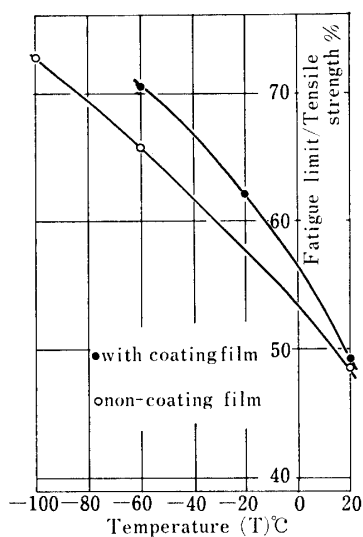


Fig. 24 Relation between fatigue limit by ensile strength of mild steel and temperature

約  $2 \times 10^6$  と減少した。

Fig. 24 には疲れ限を引張強さで除した値の各温度における値を示したが、低温になるに従い、疲れ限は引張強さに近づいているのがわかる。

### 4.3 低温における疲れの発生および進行

光弾性皮膜接着試片で疲れを解析する前に、皮膜のみに実際と同様な条件で振動を与えたが、光弾性的にも疲れが認められなかったので、皮膜に現われる複屈折は下地金属の疲れ変化のみを現わしていると考えられる。そこで、皮膜接着試片の低温での疲れ破壊挙動を調べて Figs. 25~27 のような光弾性写真および疲れひずみの変化を得た。このように、どの場合も、先ず一カ所から疲れが発生し、それが応力繰返しにより進行するとともに他の箇所からも疲れが発生した。そし

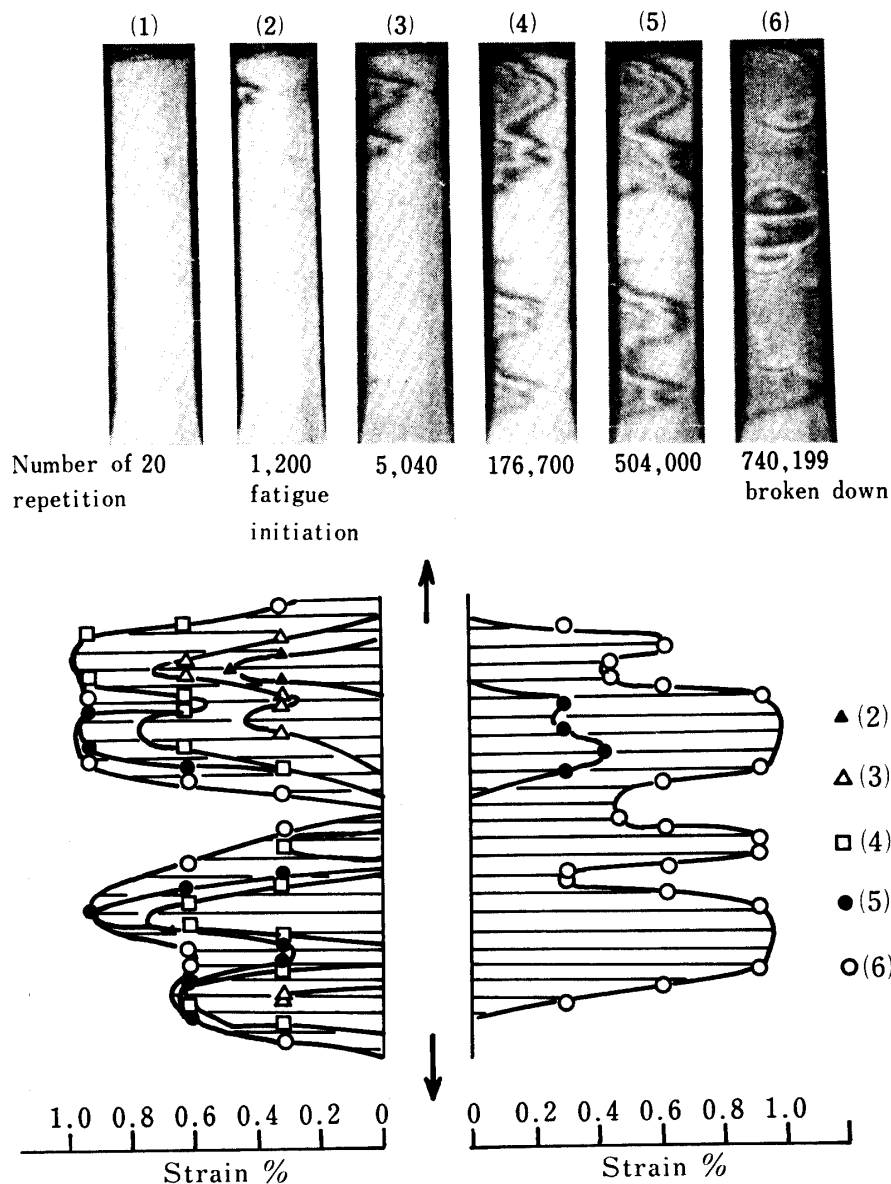


Fig. 25 Isochromatic fringe patterns and strain distributions of the progressing fatigue of mild steel under the repeated tensile stress (20°C, 20Hz,  $\sigma = 29.0 \text{ kg/mm}^2$ )



て、このように二カ所以上から発生した疲れは、それぞれ進行して最も疲れひずみの大きい場所から亀裂が発生し、そこから破断した。

20°C の雰囲気中では、Fig. 25 のように、応力繰返しにより発生した疲れが試片の全面にほぼ一様に分布した後に破断したが、-20°C の場合は Fig. 26 のように、疲れ領域は試片の一部であり、またすべり量も 20°C の場合よりも小さくて破断した。-60°C での疲れでは、Fig. 27 にも示したように、疲れ範囲は狭く、疲れひずみ量は小さく、また疲れ発生から破断までの時間が短かった。

Fig. 28 は疲れ過程での疲れひずみの試片全長に対

する平均値の変化を示したものであるが、いずれの低温雰囲気中で実験した場合も疲れはある繰返し数で急激に発生し、その疲れひずみが何回か段階的に進行した後に破断に到った。また雰囲気温度が低くなるほど、破断時の試片全体の平均ひずみも小さくなった。

Fig. 29 には疲れ発生繰返し数と繰返し応力との関係を示したが、これからも明らかなように、破断よりも相当前から疲れが発生し、その時期は低温になるほど破断繰返し数に近づいている。また、いずれの温度においても傾きは、破断を示す線よりかなり緩やかとなった。

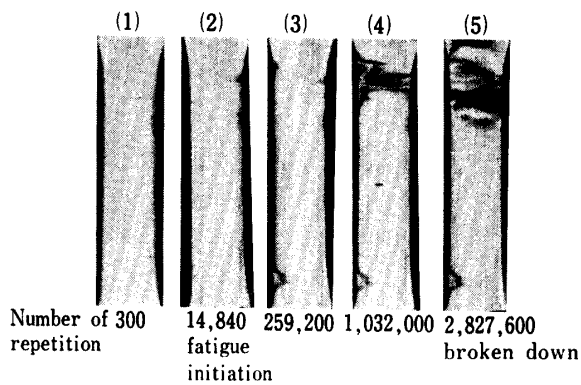


Fig. 26 Isochromatic fringe patterns and strain distributions of the progressing fatigue of mild steel under the repeated tensile stress (-20°C, 20Hz,  $\sigma = 30.0 \text{ kg/mm}^2$ )

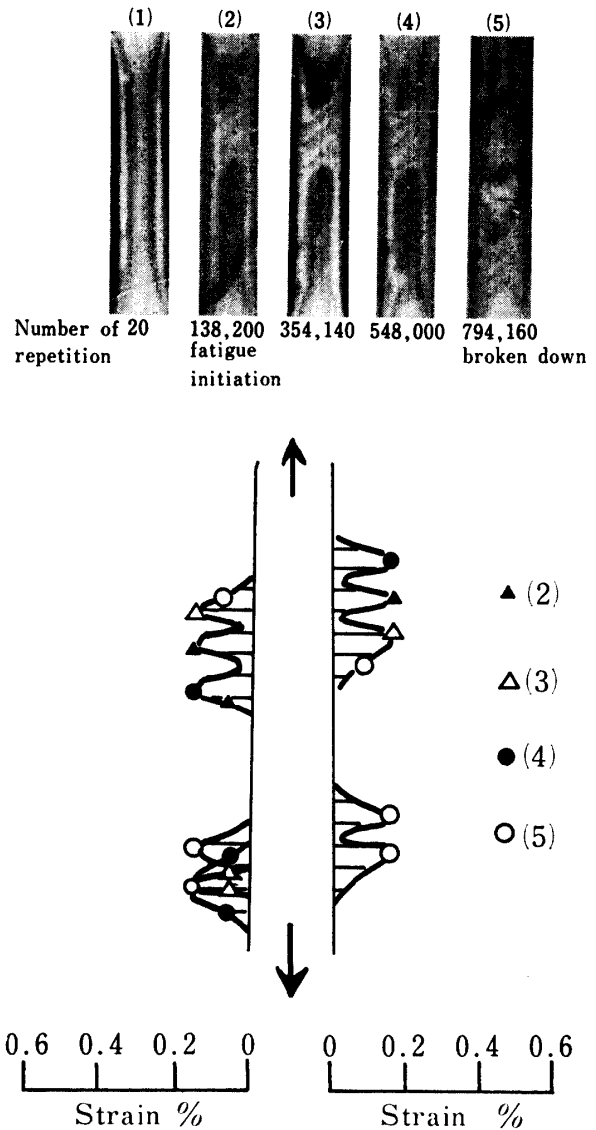


Fig. 27 Isochromatic fringe patterns and strain distributions of the progressing fatigue of mild steel under the repeated tensile stress (-60°C, 20Hz,  $\sigma = 42.0 \text{ kg/mm}^2$ )

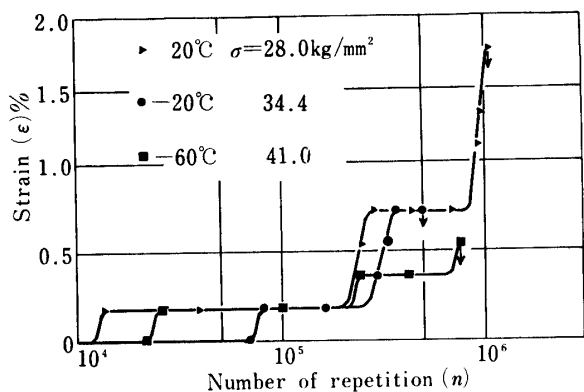


Fig. 28 Variations of strain of mild steel under the repeated tensile stress

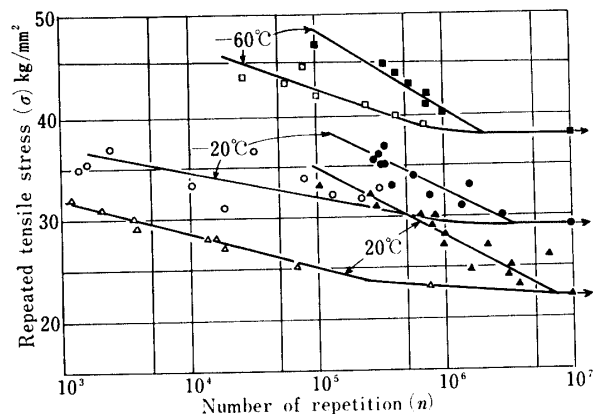


Fig. 29 Number of repetition of fatigue initiation and broken down under the repeated tensile stress

5. 結 論

セルロイド、5-5 MPE および軟鋼について常温より  $-100^{\circ}\text{C}$  に到る低温領域において繰返し引張疲れ挙動を光弾性的に解析して、次のような結論を得た。

(1) セルロイドでは動的光弾性感度が応力繰返しに

より増加して極大値となり、その後減少して亀裂が生じ破断した。

(2) セルロイドの亀裂成長速度は亀裂先端応力の増分の累乗に比例するが、試片内部に発生した亀裂よりも、自由周辺に生じた亀裂の方が早い。

(3) セルロイドの疲れ強度は  $-100^{\circ}\text{C}$  で常温の約3倍となり、また、低温疲れ強度は静的強度の約1/2.5となった。

(4) 5-5 MPE の疲れでは動的複屈折効果が減少して破断に到るが、 $-50^{\circ}\text{C}$  以下の低温では、ほとんど変化することなく破断した。

(5) 5- MPE の繰返し数  $10^6$  回に対する疲れ強度は  $-50^{\circ}\text{C}$  で常温の約2倍、また、常温および  $-50^{\circ}\text{C}$  における疲れ強度はいずれも静的強度の約1/4となった。

(6) 軟鋼の S~n 線図の勾配は、低温になるほど減少する。

(7) 軟鋼では疲れ限は低温になるに従って高くなり、静的引張強さにほぼ等しくなる。

(8) 軟鋼では低温になるほど疲れの発生は遅く、疲れ範囲も狭く、かつ、疲れひずみ量も小さくて破断する。

(9) 軟鋼では疲れひずみは段階的に進行する。

文 献

- 1) 三木教；日本機械学会論文集，**23**，No. 127，184~189 (1957)
- 2) S. Miki；Proc. 18th Japan Nat. Congr. Appl. Mech. 1968<sup>2</sup>，177~182，183~188 (1970)
- 3) 三木教；応力と歪，**1**，No. 3，22~30 (1971)
- 4) 三木教；第1回全国光弾性シンポジウム論文集 (1972)，pp. 81~98
- 5) 三木教；光弾性学要論，理工新社 (1974)