

# 温度変動下における軟鋼の高温疲労 (第2報)\*

清水 茂俊\*\*・望月太喜雄\*\*\*・藤満 達朗\*\*

## High Temperature Fatigue of Mild Steel under Varying Temperatures (2nd. Report)

Shigetoshi SHIMIZU, Takio MOCHIZUKI, and Taturō FUJIMITSU

### Abstract

In the previous paper, we showed the characteristics of high temperature fatigue strength of mild steel SM41A, i. e., the maximum and minimum value of fatigue strength appeared at 400°C and 150°C, respectively, and this value decreased with raising the temperature above 400°C and showed the same value as minimum one at 500°C.

From this point of view, we set up four kinds of situation of temperature during fatigue test, that is: For case A, we hold  $N_r$  cycles at 500°C then drop to 150°C, on the contrary, the first  $N_r$  cycles are held at 150°C then raised to 500°C for case B. Case C is a convex type such as the specimen is held at 150°C in the first 30 minutes, then raised to 500°C during  $N_r$  cycles and downed to 150°C again. Case D is the same type as case A except the initial temperature is held at 400°C.

The rotary-bending fatigue tests are made under these temperature conditions associated with the three different stress values. According to the experimental results, the fatigue strength value is higher than the results at the constant temperature both 150°C and 500°C for case A, B and C. For case D, increasing hold cycle  $N_r$  the fatigue strength reaches the maximum value at 400°C.

### 1. 緒 言

温度変動疲れ試験に関しては Dunsby<sup>1)</sup>, Малвевич<sup>2)</sup>の実験および青熱ぜい性域<sup>3)・5)</sup>をひずみ時効の強化ならびに硬化をもって説明を試みた加藤らの実験<sup>6)7)</sup>その他安藤らの実験<sup>8)</sup>および筆者らの一連の実験<sup>9)・11)</sup>がある。

前報告<sup>9)10)</sup>では著者らは周期的温度変動モデル(三角波形および台形波形)を用いて曲げ疲れ試験を行いS-N曲線を求め、つぎに相当温度 $T_e$ なるものを仮定し、この $T_e$ に対する繰返し応力を温度一定曲げ疲れ試験の結果より求めた温度—繰返し応力線図より各時間強度について求めて、温度変動モデルのS-N曲線と比較した結果、両者がよく一致することを報告した。

本報告では SM41A を用いて温度が単一波形状に変化する場合、たとえば上限温度から下限温度へ、下限温度から上限温度へ、それぞれステップ状に変化する場合および凸状に変化する場合について調べた。すなわち前報告の結果より図4、図5に示すように材料の疲れ強度は150°Cで最低となり、400°Cで最高値を示し、400°C以上ではしだいに低下し500°Cではふたたび150°Cに近い値を示し、これ以上の温度では急激に疲れ強度が低下することがわかった。したがって上限温度として500°C、下限温度として150°Cを選べば一度は最高強度を与える400°Cを経験することになり、疲れ強度は150°C、500°Cにおけるいずれの値よりも増すことが予想される。また疲れ試験中に上限温度を経験させる時期によっても、その影響が考えられる。そこで著者らは温度を500°Cから150°Cへ、150°Cから500°Cへそれぞれステップ状に変化させる場合、150°C一定の途中で500°Cに上げふたたび150°C

\* 昭和49年7月12日 日本機械学会中国四国支部山口地方講演会にて講演

\*\* 機械工学科

\*\*\* 宇部工業高等専門学校

に下げるいわゆる凸状に変化させる場合および最高強度を与える400°Cから150°Cにステップ状に変化させる場合の4通りについて実験を行い、上限保持時間あるいは下限保持時間をそれぞれ5分から300分にわたり変化させてその影響を調べた。

2. 疲れ 実験

2・1 実験材料, 実験方法および装置

使用した試験片の寸法および形状を図1に示す。使用材料は前報告においても使用した溶接圧延鋼板キルド鋼 SM41A (納入のままのもの) で表1, 表2に化学成分ならびに機械的性質を示す。試験機は高温小野

式回転曲げ疲れ試験機で実験方法は前報告と全く同じである。

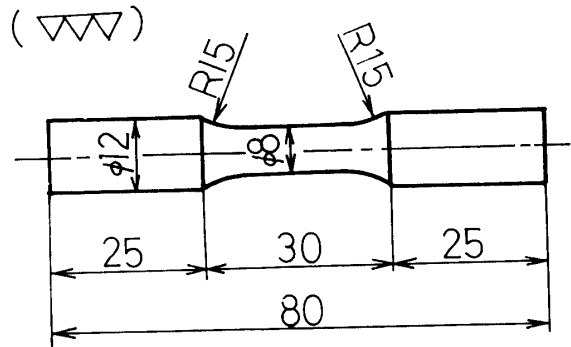


Fig. 1 Test specimen.

Table 1 Chemical compositions of materials.

Material	Symbol	Chemical composition (%)				
		C	Si	Mn	P	S
Rolled steel for welded structure	SM41A	0.150	0.210	0.650	0.013	0.014

Table 2 Mechanical properties of materials.

Symbol	Yield stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Ultimate strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SM41A	29.0	45.0	30.0

2・2 温度変動モデル

4種類の温度変動波形をモデルとしてA, B, C, Dで表わし、それらを図2に示す。上限温度保持時間あるいは下限温度保持時間を $t_r$ で示し、各モデルに対する $t_r$ の種類をa~fで表わす。表3は各モデル

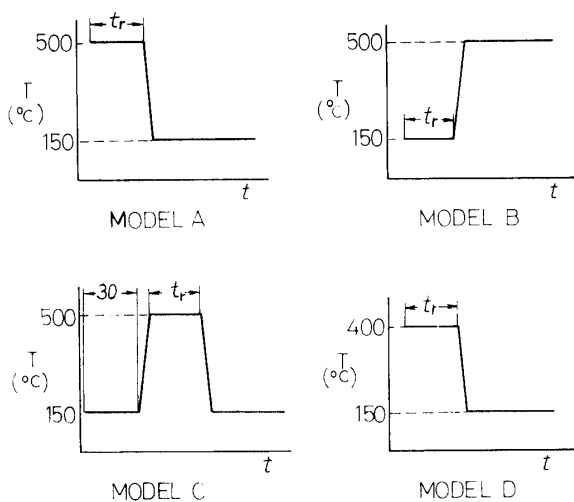


Fig. 2 Models of variation of temperature.

の保持時間を示す。図3に記録例を示す。

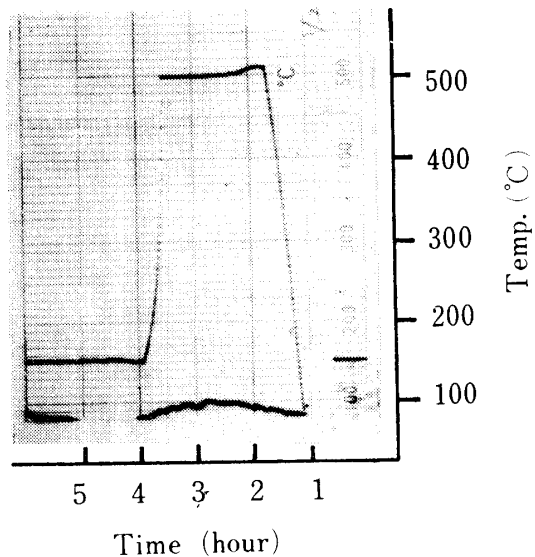


Fig. 3 An actual datum for model A.

Table 3 Numerical values of holdtime.

Model	Time Symbol	$t_r$ (min.)					
		a	b	c	d	e	f
A		15	30	60	90	/	/
B		5	15	30	45	60	90
C		7	15	30	60	90	/
D		7	15	30	60	120	300

3. 実験結果および考察

SM41A の温度一定疲れ試験の結果を図4, 図5に示す。400°Cで最高強度が得られることがわかる。

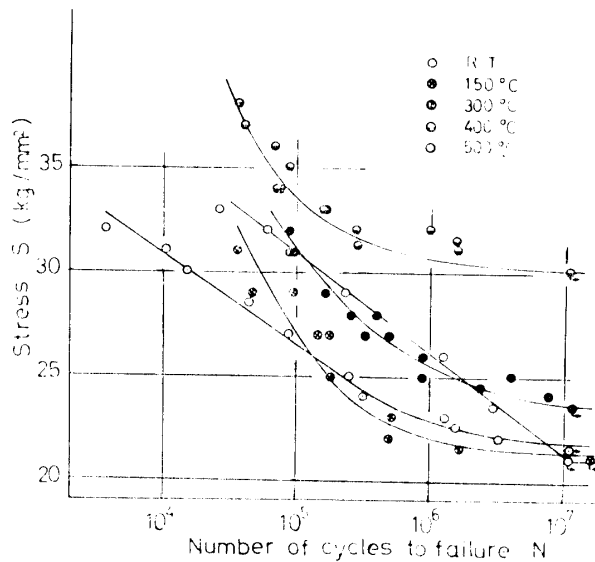


Fig. 4 S-N curves of SM41A (as received) at R.T., 150°C, 300°C, 400°C and 500°C.

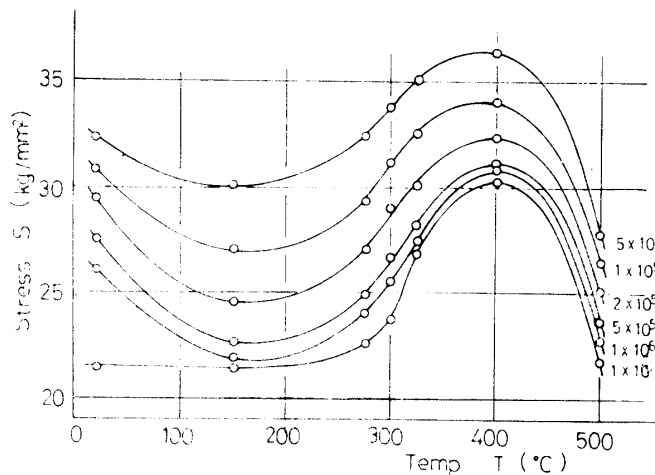


Fig. 5 Temp.-repeated stress diagram with endurance strength as a parameter (for SM41A).

つぎに温度変動疲れ試験に関してモデル A~D に対する結果を対数をとって整理したものを図6~図9に示す。図において  $N_r$  はモデル A, C, D に対しては上限温度保持時間に対する繰返し数を, モデル B に対しては下限温度保持時間に対する繰返し数を示す。モデル A および C に対しては 500°C 温度一定疲れ試験に対する破断繰返し数を基準にとり  $N_{500}$  で表わし, モデル B に対しては同様な意味において  $N_{150}$  を, モデル D に対しては  $N_{40}$  をそれぞれ基準にとり, これらの基準値で  $N_r$  を除したものを各図における縦軸の値とした。図6において  $\log_{10} N_r / \log_{10} N_{500} = 1.0$  は上限温度500°C一定,  $\log_{10} N_r / \log_{10} N_{150} \rightarrow 0$  は下限温度150°C一定の疲れ寿命をそれぞれ示す。図6~図8についてつぎのことがいえる。いずれの場合も 500°C 一定あるいは, 150°C 一定試験の場合よりも寿命が伸びて, 応力が小さいほど, その伸びは大きく, 寿命の最大はモデル A, B に対しては15分から30分において生じ, モデルCに対してはおよそ15分から90分において生じた。最高強度を与える温度を最適温度と呼ぶことにすれば, この寿命の伸びは温度変動の途中において最適温度400°Cを経験するために生じると考えられる。図9においては寿命はおよそ保持時間に比例して伸びて最適温度400°Cの寿命に近づく。400°Cに対する疲れ強度は 30kg/mm<sup>2</sup> であるので, この疲れ強度以下の応力で繰り返す限り, モデルDについては寿命が最適温度に対する寿命を越えることはないものと推定できる。

モデル A, B において応力  $S = 24\text{kg/mm}^2$ , 上限温度経験時間60分の下で500°Cを先きに経験させたモデル A では相当温度<sup>9)10)</sup>  $T_e = 204^\circ\text{C}$ , モデル B では  $T_e = 305^\circ\text{C}$  を得た。すなわち前報告で定義した相当温度  $T_e$  は, 上記の両者については等しくならない。このことは前報告のような周期的温度変動波形の場合は, 相当温度でもって寿命を論ずることができるが, 本報告のような単一波形の場合は, 寿命が温度および応

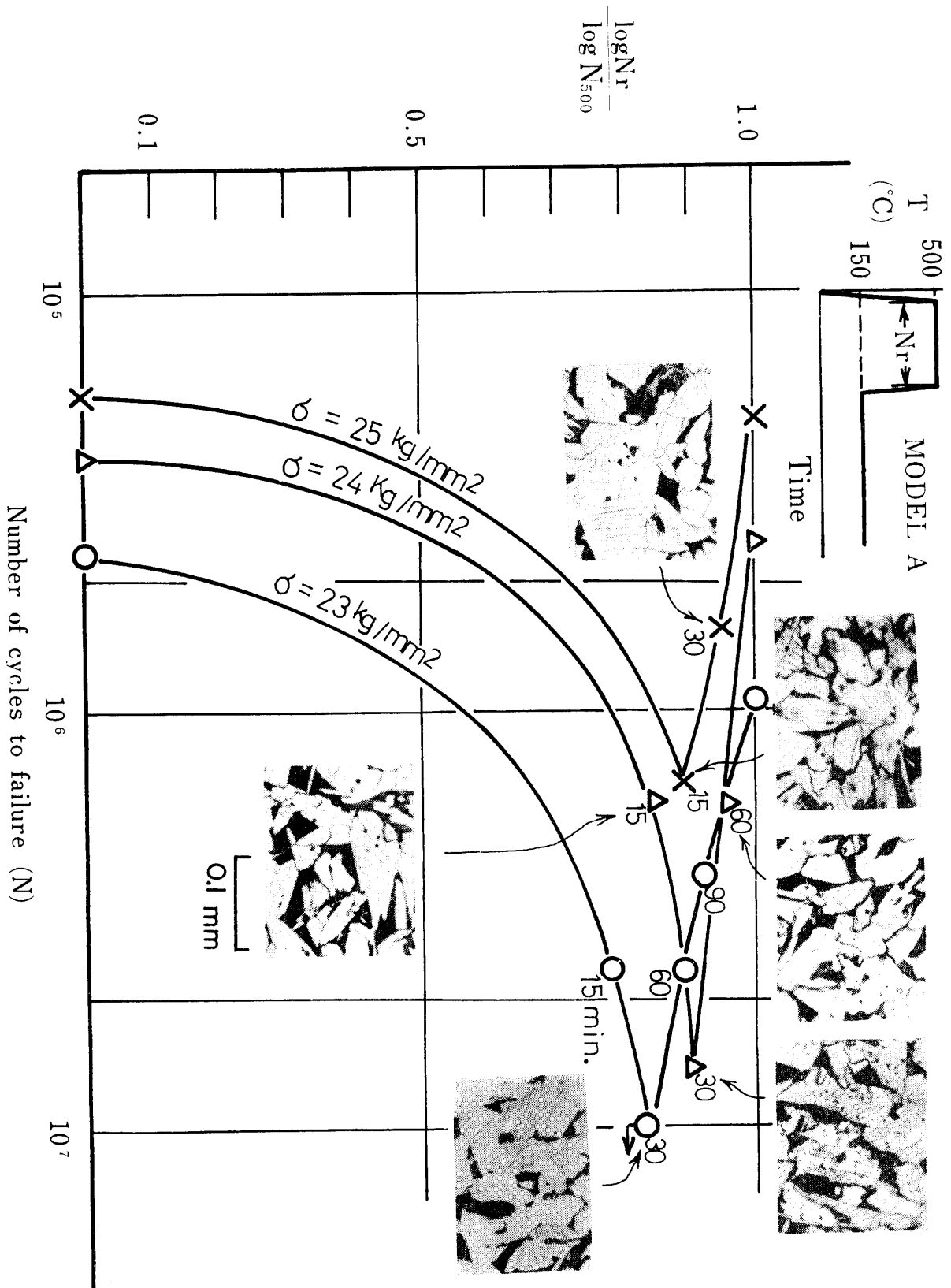
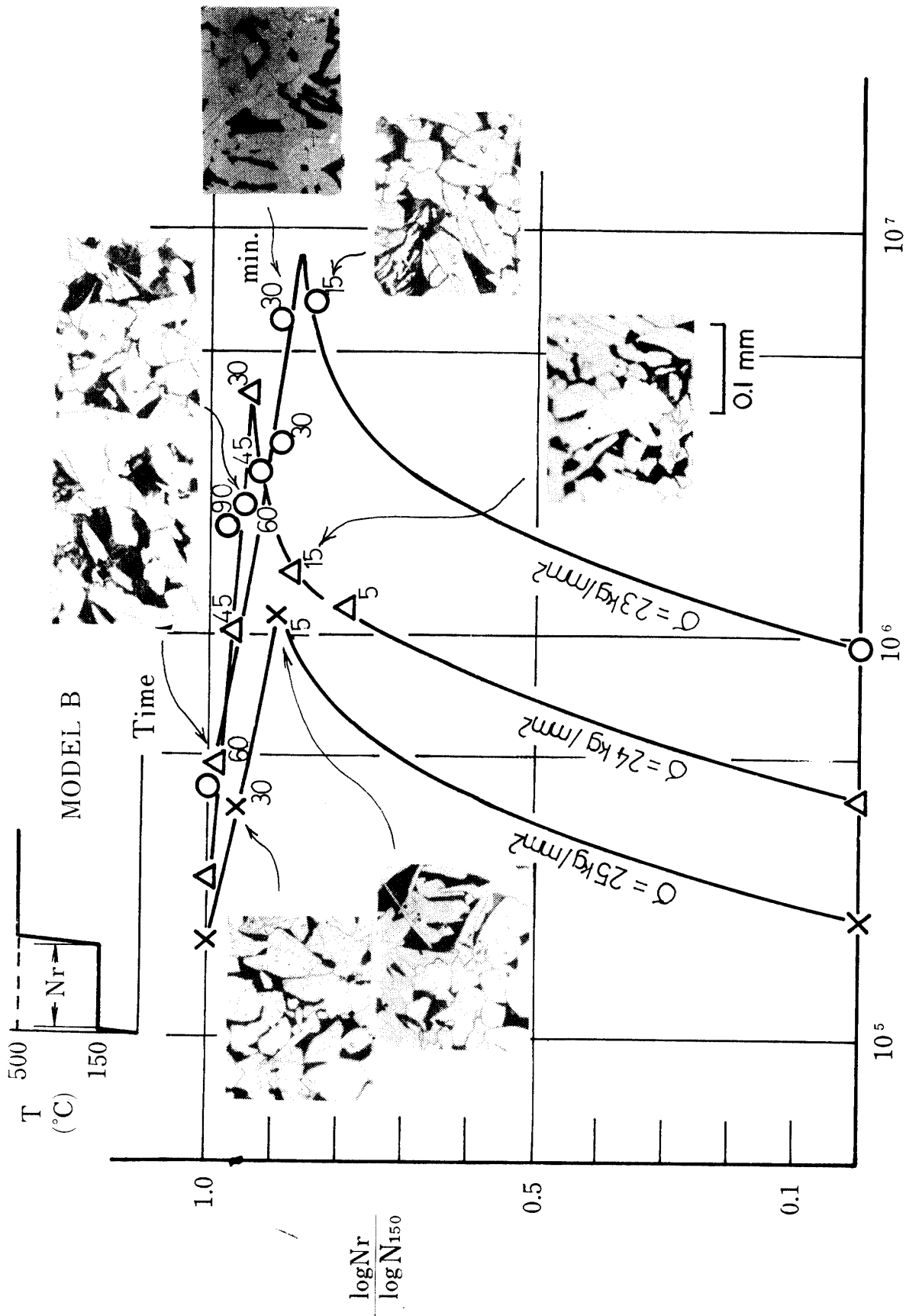


Fig. 6  $\log N_r / \log N_{5000}$  versus  $\log N$  curves of model A.



Number of cycles to failure (N)

Fig. 7 Log  $N_r$ /log  $N_{150}$  versus log N curves of model B.

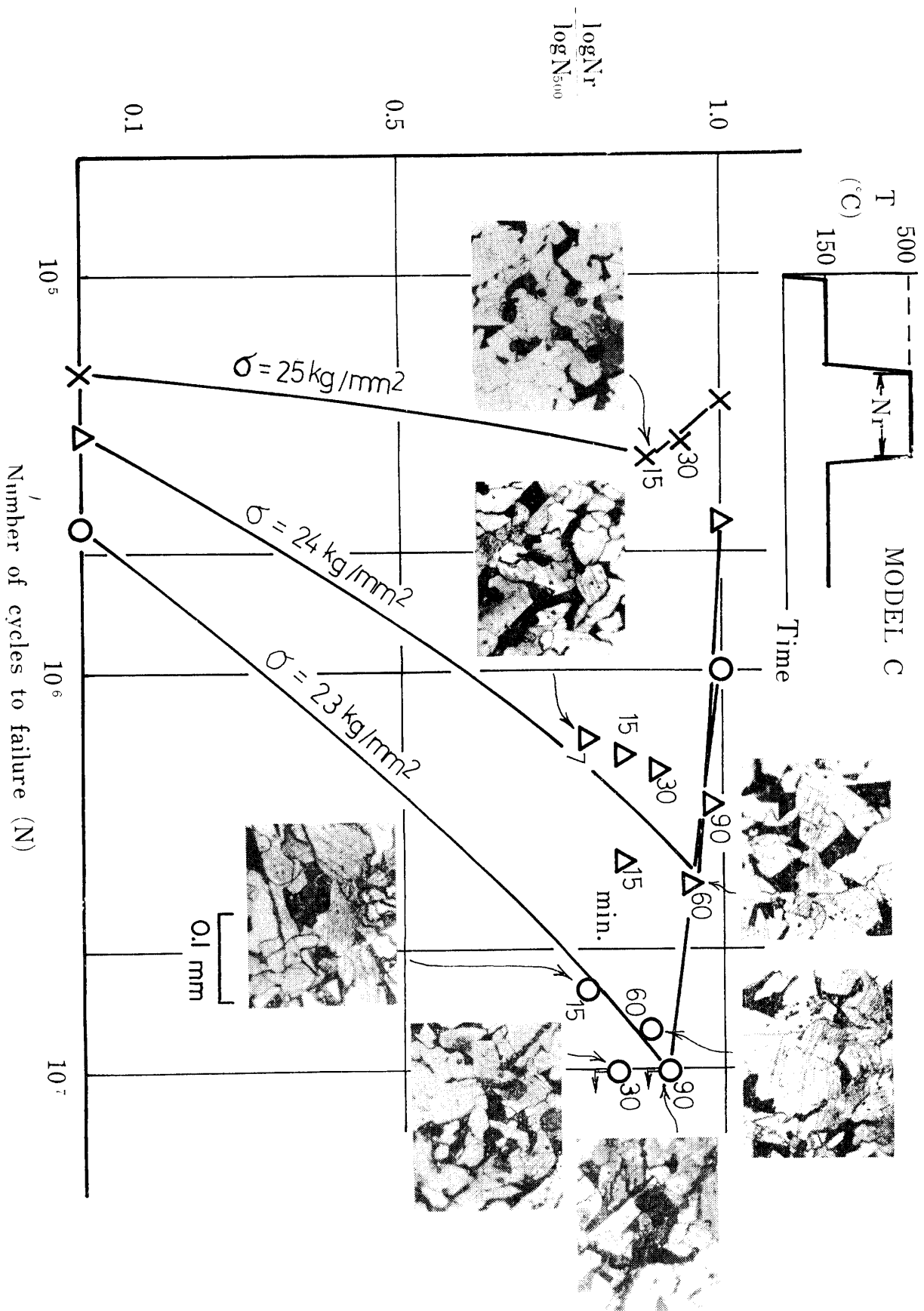
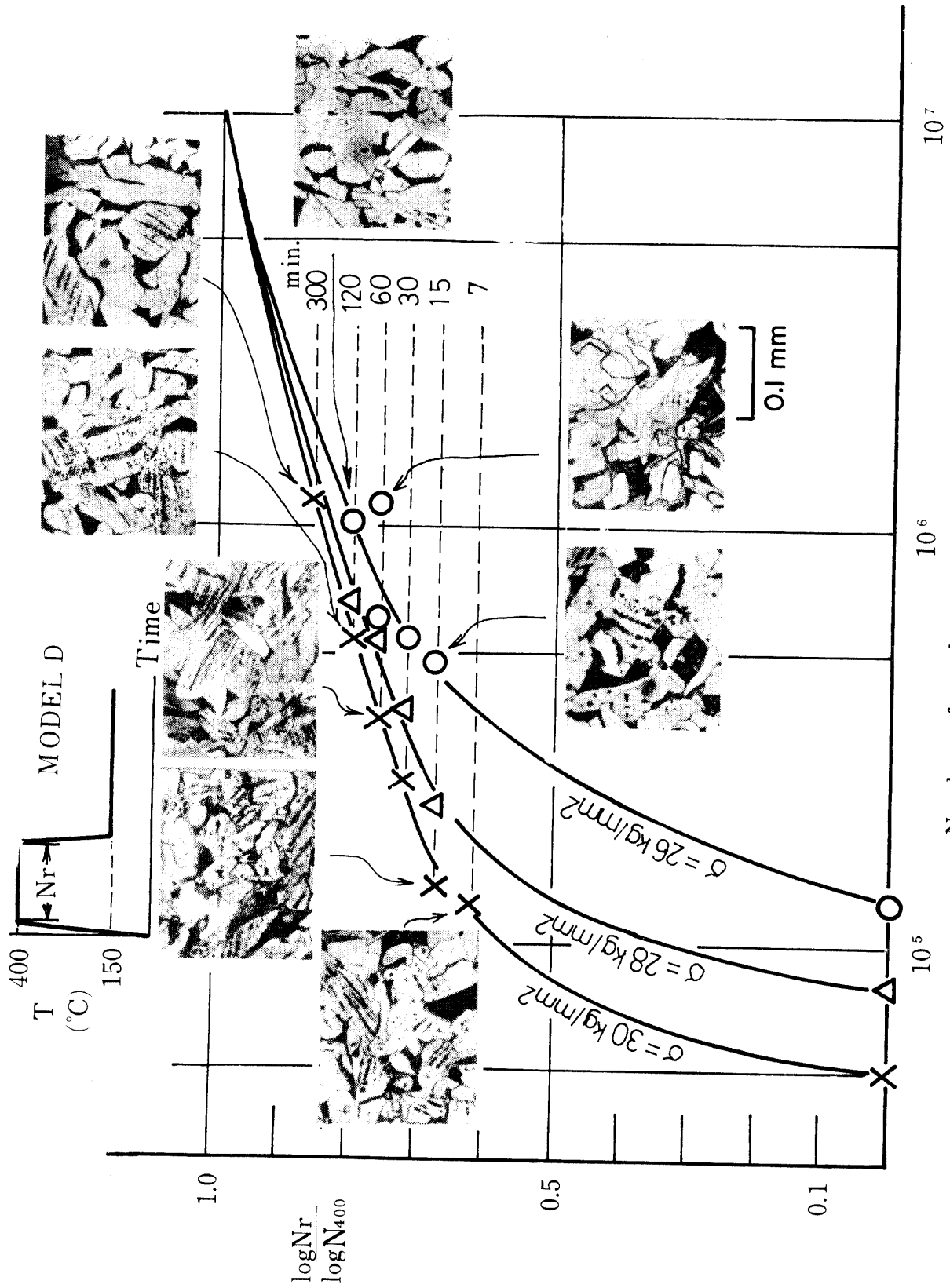


Fig. 8 Log  $N_f / \log N_{500}$  versus log N curves of model C.

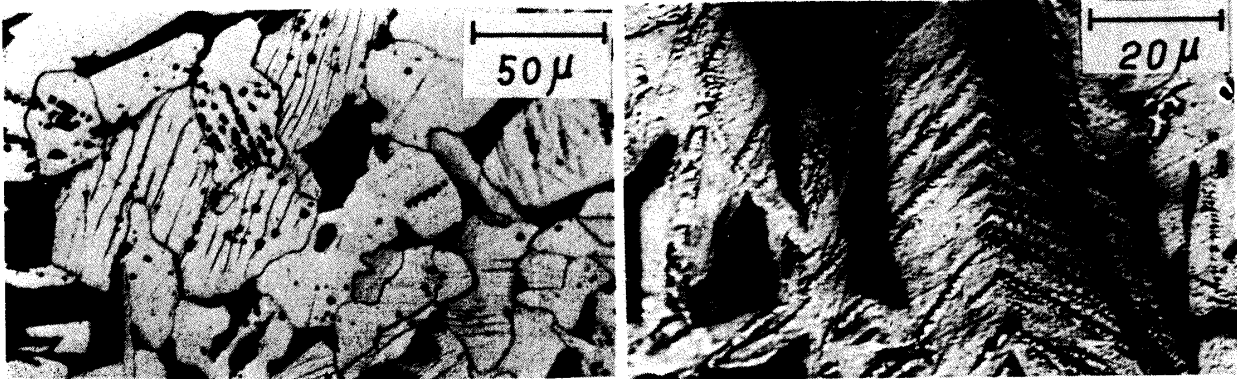


Number of cycles to failure ( $N$ )  
 Fig. 9  $\log N_r / \log N_{400}$  versus  $\log N$  curves of model D

力に関する依存性を有するのみならず、上限温度を与える時期にも関係するために  $T_e$  だけでも論ずることはできないと考えられる。また青熱ぜい性域においてひずみ時効による強化<sup>6)7)</sup> すなわち溶質原子 (N, C) と転位との相互作用による強化、あるいは Rosenfield らの動的ひずみ時効による強化<sup>4)5)</sup> が生じているとしても、上述のモデル A, B について  $T_e$  が等しくならぬことはそれらが内容的に同一でないことを示しているといえる。

各温度変動モデルに対するすべり線の発生状況を比較するための光学顕微鏡組織写真を図6～図9に併せ

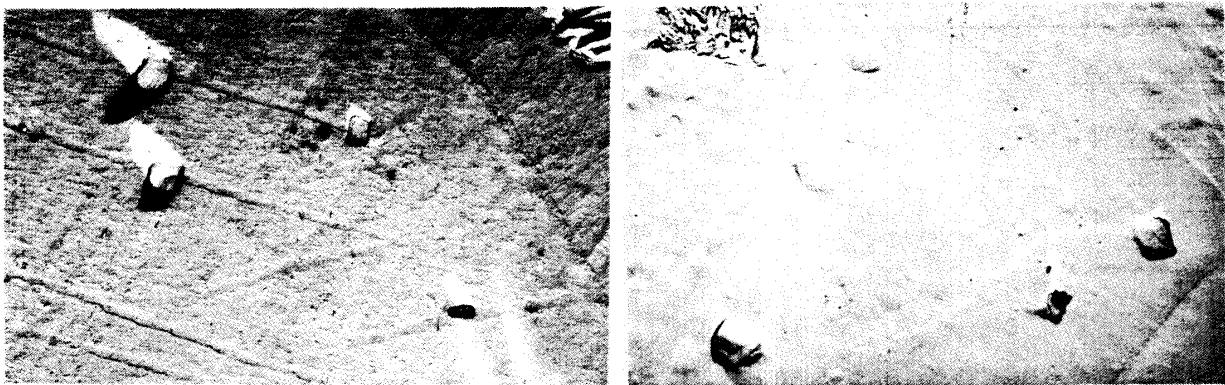
て示す。モデル A の場合、すべり線はかなり発生し、とくに寿命が最も伸びる付近でその発生は激しい。モデル B の場合は  $S=25\text{kg/mm}^2$ ,  $t_r=30\text{分}$  において少しみられる外は、他の何れの場合においてもすべり線はほとんどみられない。これは前報告に述べたすべり線のほとんど発生しない一次温度  $150^\circ\text{C}$  の影響のためと考えられる。モデル C の場合他にくらべ応力および保持時間に無関係にすべり線は激しく発生している。これはモデル C が、モデル B にモデル A を追加したものと解釈すればある程度理解される。図9に示すモデル D の場合は4つのモデルの中で最もすべり線



(a)  $T=275^\circ\text{C}$ ,  $S=24\text{kg/mm}^2$  ( $\times 270$ )

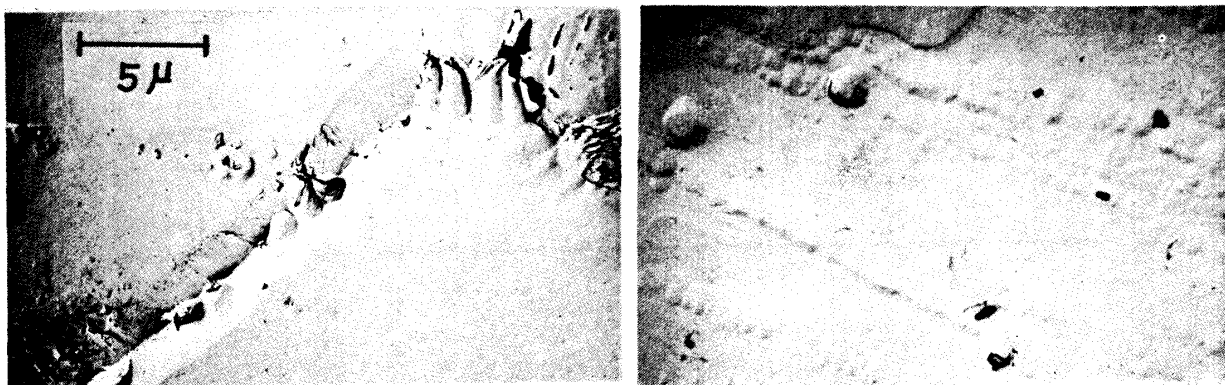
(b) Model C,  $S=24\text{kg/mm}^2$ ,  $t_r=30\text{min.}$  ( $\times 700$ )

Fig.10 Microstructures of specimens under constant temperature and varying temperature



(a)  $T=300^\circ\text{C}$ ,  $S=32\text{kg/mm}^2$

(b) Model A,  $S=24\text{kg/mm}^2$ ,  $t_r=30\text{min.}$



(c) Model B,  $S=24\text{kg/mm}^2$ ,  $t_r=30\text{min.}$

(c) Model C,  $S=24\text{kg/mm}^2$ ,  $t_r=30\text{min.}$

Fig.11 Etch pits and slip bands in electron micrographs of specimens under constant temperature and varying temperatures. ( $\times 2700$ )



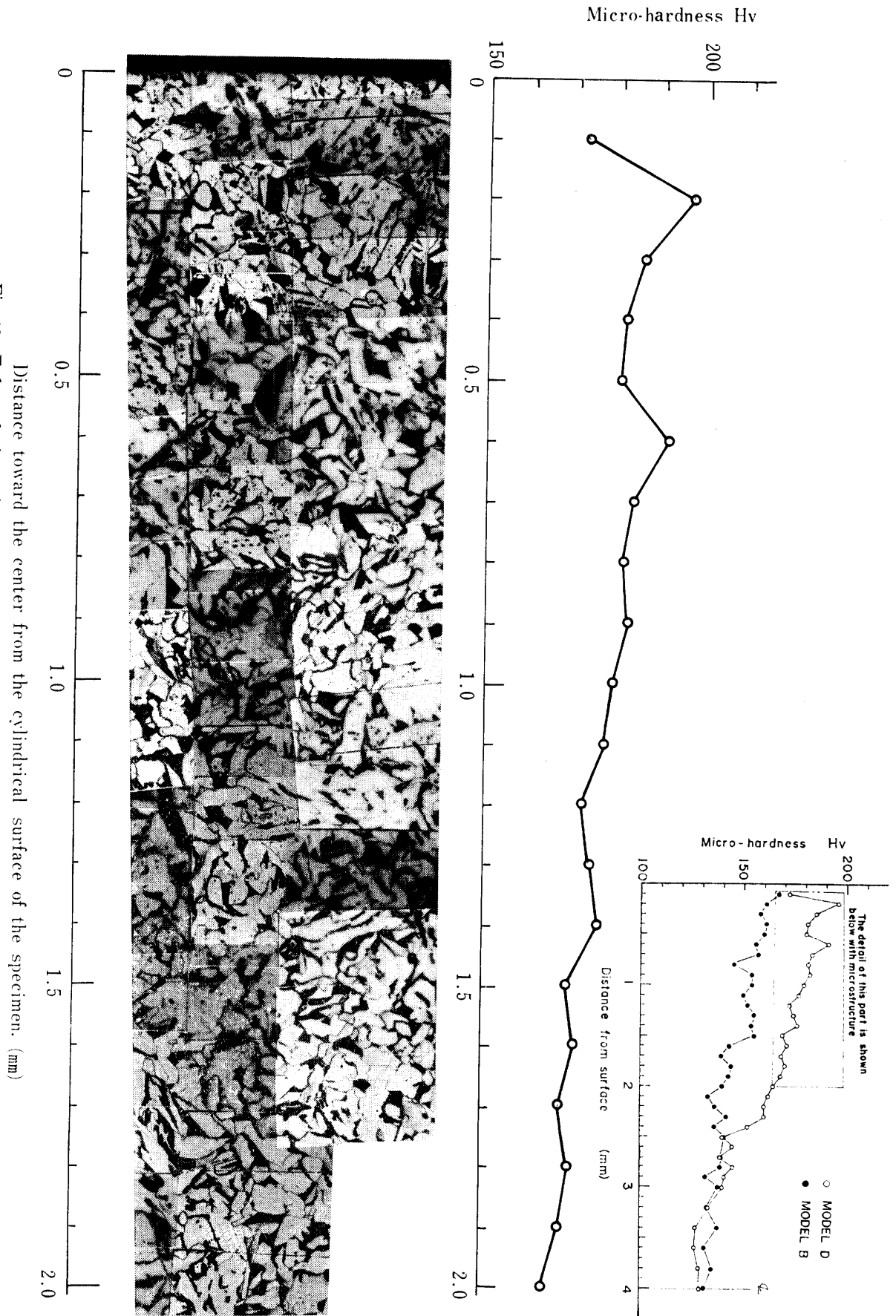


Fig. 12 Enlarged view of microstructure of the specimen (for Model D).

の発生が激しい。これも前報告の最適温度 $400^{\circ}\text{C}$ 一定試験においてすべり線がある程度発生していたことおよび $500^{\circ}\text{C}$ ではほとんど発生していなかったことを考えれば一応理解できる。

図10に $275^{\circ}\text{C}$ 温度一定試験およびモデルCの場合のすべり線およびピットを示す。図11に各モデルのピットおよびすべり線の発生をレプリカ法による電顕写真で示す。ピットの形状「□」は「100」面を示す。

図12にモデルD ( $S=30\text{kg}/\text{mm}^2$ ,  $t_r=30$ 分)の場合の周辺から中心に向っての光学顕微鏡組織写真および硬さの変化を示す。周辺より少し入った部分、 $0.2\text{mm}$ から $0.4\text{mm}$ 付近(直径比にして周辺より約3~5%付近)にとくに激しくすべり線が発生している箇所が散見され、中心部に向うにつれて減少する様子がみられることは興味深い。またモデルDの硬さについても、すべり線のほとんど発生しないモデルBに比較して、中心部では大体同一値をとるにもかかわらず周辺近傍ではかなり硬さの差がでていいることは温度一定疲れ試験における硬さとすべり線の発生状況を併せ考えれば、すべり線の発生が硬化の一因になっていると考えられる。

#### 4. 結 論

- 1) 最適温度 $400^{\circ}\text{C}$ に対して上限温度、下限温度をそれぞれ $500^{\circ}\text{C}$ 、 $150^{\circ}\text{C}$ に選んで上限温度を与える時期を3通りに変化させた場合、何れの場合も寿命は上限、下限温度一定の場合よりも伸びるが、最高寿命はモデルA、Bの場合、保持時間が15分から30分に対して生じ、かなり近い傾向を示すが、モデルCの場合は15分から90分に対して生じ、各応力に対する寿命曲線も少し異なる傾向を示す。
- 2) 最適温度から $150^{\circ}\text{C}$ へ温度をステップ状に下げる場合は、最適温度に対する疲れ強度以下の応力で繰返す限り、寿命は直線的に増加するが最適温度の寿

命を越えることはない。

- 3) すべり線はモデルD、C、A、Bの順に激しく発生し、モデルBではほとんど発生していない。モデルDの場合は低応力よりも、高応力に対して激しく発生し、Cの場合は応力、保持時間に無関係に発生がみられ、Aに対しては破断繰返し数が、最高寿命を与える付近において多発している。

終りに材料の提供を賜った日本鋼管KK、ならびに昭和48年度機械工学科卒業生宮内省司、三浦啓志両君、および機械工学科4年生田崎正史、田中欣一両君の労に対し深甚なる謝意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) J.A. Dunsby, ASTM, Proc., 65 (1965) P. 736
- 2) A.B. Малвквич, Т.К. Маринец, В.М. Рахман, Извест ВУЗ Машиностр., 12, (1964) P. 39
- 3) J.C. Levy, G.M. Sinclair, Proc. ASTM, 55, (1955) P. 866
- 4) 藤野宗昭, 新田哲夫, 山本正弘, 平修二: 材料20, 211 (S46-4) P. 467
- 5) 藤野宗昭, 新田哲夫, 山本正弘, 平修二: 材料 20, 214 (S46-7) P. 827
- 6) 加藤容三, 広瀬素尚: 日本材料強度学会誌, 5, 1 (S45) P.11
- 7) 加藤容三, 広瀬素尚: 日本材料強度学会誌, 5, 4 (S 45) P. 115
- 8) 安藤善司, 加藤容三, 中野典彦: 材料試験, 11, 105 (S37-3) P. 379
- 9) 清水茂俊, 望月太喜雄, 藤満達朗: 機講論集, No. 735-1 (S48-7) P. 41
- 10) 清水茂俊, 望月太喜雄, 藤満達朗, 織田良範: 山口大学工学部研究報告 24, 2 (S 48-12) P. 131
- 11) 清水茂俊, 望月太喜雄, 藤満達朗: 機講論集, No. 745-1 (S49-7) P. 41

(昭和49年10月15日受理)