

# 温度変動下における軟鋼の高温疲労 (第1報)\*

清水 茂俊\*\*・望月太喜雄\*\*\*・藤満 達朗\*\*・織田 良範\*\*

## High Temperature Fatigue of Mild Steel under Varying Temperatures (1st Report)

Shigetoshi SHIMIZU, Takio MOCHIZUKI,  
Taturô FUJIMITSU and Yoshinori ODA

### Abstract

The object of this investigation is to estimate the high temperature fatigue strength of mild steel under varying temperature by assuming the equivalent temperature  $T_e$  as

$$T_e = \frac{1}{\bar{N}} \int_0^{\bar{N}} \alpha(N, T) T(N) dN$$

where,  $\bar{N}$  is the number of cycle and  $\alpha(N, T)$  is a weight function, depending upon the temperature and cycles.

We made rotary-bending fatigue tests of two kinds of mild steel, SM41A as received and S12C annealed at 910°C under various temperature conditions.

The  $S-N$  curves obtained from the experiments under three simple models of cyclic temperature changes coincided very well with the curves which we made from the stress versus temperature curves for each endurance strength of the material at the equivalent temperature  $T_e$ , assuming  $\alpha = 1$ .

We could also substantiate this result by referring to the microstructures of both specimens which were exposed to varying temperature and equivalent temperature under the same bending stress.

### 1. 緒 言

金属材料が高温下において繰返荷重を受ける場合の疲労強度については、疲労部門委員会による各種耐熱鋼等に対する実験報告<sup>1)</sup>を始めとしてかなりの実験結果が得られている<sup>2)~27)</sup>。すなわち、比較的低速度下 (1000~3000 rpm) の高温曲げ疲労試験の場合、低炭素鋼に関しては青熱脆性のため 300°C 付近で疲れ強さが最高になることが河本<sup>2)</sup>、平<sup>3)</sup>、安藤等<sup>4)</sup>により報告され、Coffin<sup>5)</sup>も 10~180 rpm の極低速で実験し 300°C 付近で最大強度を得ている。また Allen等<sup>6)</sup>は低炭素鋼に関して極低速 (10 rpm) と低速度 (2000 rpm) の場合を実験し、前者に対して 300°C、後者に対して 350°C 付近で最大強度を得ており、高温の場合は歪速度が大きいと貫粒破壊を生じ、そのため高速の方が最大疲労強度が高温側にずれるものと説明している。また 0.12% C 炭素鋼について繰返速度 1700 rpm

において、500°C で最高強度が得られたことも安藤等<sup>7)</sup>によって報告されている。河本等<sup>8)</sup>は 0.13% C および 0.63% C 炭素鋼を用いて 300°C および 500°C の温度に対して繰返速度 1000 rpm および 2500 rpm でもって実験を行い、結果として 300°C の方が疲労強度が高く、かつ両温度に対して高速の方が疲労強度が高いと報告している。また河本等<sup>9)</sup>は 0.21% C 炭素鋼、Cr-Mo-V 鋼を用いて 7500~15000 rpm の高速度範囲における実験を行い、500°C において 15000 rpm の方が 7500 rpm より疲労強度が低下するという結果を得ている。また高速繰返速度下において低炭素鋼の場合 500°C において最高疲労強度が得られた場合と 300°C において最高強度が得られたこと、すなわち同一材料において青熱脆性が高温側に移行する場合と移行しない場合が生じたことも河本等<sup>10)</sup>によって報告されている。

高温の場合、応力-歪関係が繰返速度により変わることが考えられる故、西原<sup>11)</sup>および平等<sup>12)</sup>はたわみ振幅を、換言すれば歪振幅を基準にした試験を行い、試験片表面における歪振幅と破断繰返数との関係を求め、歪振幅が同一であれば振幅の大きい範囲 (破断までの

\* 昭和48年7月25日 日本機械学会中国四国支部広島地方講演会にて講演

\*\* 機械工学科

\*\*\* 宇部工業高等専門学校

繰返数にして  $10^6$  以下) では繰返速度に無関係にほぼ同一の繰返数で破断し, 振幅の小さい範囲では繰返速度の小さいほど破断までの繰返数もまた小さく, 振幅の減少とともに一定時間で破断する傾向に近づく結論している。

高温疲労における切欠係数と温度の関係についても多数の研究<sup>11), 13)</sup>があり, 疲労過程の履歴仕事と温度との関係についても,  $0^\circ\sim 100^\circ\text{C}$  の温度範囲で時効の起りがたいキルド鋼を用いた実験が郡等<sup>14)</sup>により報告されており, 試験温度と結晶組織についても林等<sup>15)</sup>は常温から  $260^\circ\text{C}$  の温度範囲に対してアルゴンガス中の炭素鋼について細束 X線を用いて調べている。

一定温度下における定歪高温疲労試験結果より熱疲労強度を推定することを目的とする研究も Coffin<sup>16)</sup>, Baldwin<sup>17)</sup>, Maijors<sup>18)</sup>, 平等<sup>19)</sup>により行われ, 平等は一定温度下の定歪高温疲労試験結果から塑性歪と疲労損傷の間の関係式を熱疲労の場合に適用して有効温度を求めている。

熱疲労寿命則についても, イ) 平均温度を一定とすれば温度の影響は 2 次的なものとなる考え方, ロ) 有効温度なる概念の導入<sup>19)</sup>, ハ) 上限温度重視の主張, ニ) 塑性歪エネルギーを基準にしたもの等が考えられるが定説は未だないと平等<sup>20)</sup>は述べている。

温度をどのように評価すれば実験データを統一的に把握できるかという問題に対して, 平等<sup>20)</sup>は  $0.16\% \text{C}$  炭素鋼を用いて温度の代表値として平均温度および温度変動幅を取り上げ, 平均温度, 温度変動幅, ひずみ範囲を変化させて, 熱疲労寿命に及ぼす温度の影響を調べている。

ところで温度変動を受ける場合については, 熱疲労<sup>19)~22)</sup> および運転休止の影響を調べることを目的とするもの<sup>3), 23)~25)</sup>を除けば極めて少いように思われる。著者等が調べたところでは, Dunsby<sup>26)</sup>が Al 合金と不銹鋼を用いて, 室温から高温, 高温から室温へのいわゆるステップ状温度変動を与えた実験を行っている。この場合, 最高温度は Al 合金に対して  $205^\circ\text{C}$ , 不銹鋼に対して  $370^\circ\text{C}$  である。

また, Малвквич 等<sup>27)</sup>は耐熱材料を用いて, 温度の周期的変化の形式と温度変動レベルの影響について調べている。温度変化の範囲は  $800^\circ\text{C}\pm 100^\circ\text{C}$ ,  $850^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ ,  $900^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$  である。

著者等は高温疲労における温度変動の影響を調べるために常温から  $550^\circ\text{C}$  の範囲で, まず SM41A および,  $0.12\% \text{C}$  炭素鋼を用いて温度一定疲れ試験を行い, 時間強度をパラメータとした温度—繰返応力線図を実験的に求め, 次に簡単な周期的温度変動モデルを

用いて疲れ試験を行い,  $S-N$  曲線を求め, 相当温度  $T_e$  なるものを仮定し, この  $T_e$  に対する繰返応力を上述の温度—繰返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, 良い結果が得られた。

## 2. 疲労実験

### 2.1 材料および試験片

使用した試験片の寸法および形状を図 1 に示す。使

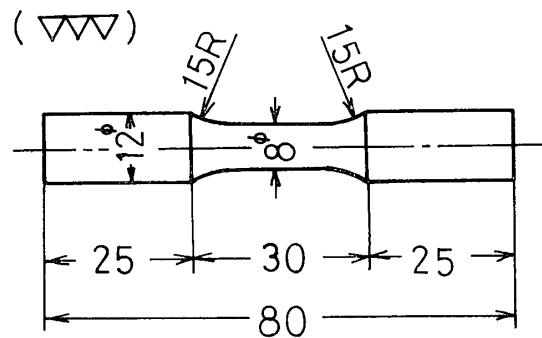


Fig. 1 Test specimen.

用材料は板厚  $30\text{mm}$  の溶接圧延鋼板キルド鋼 SM41A (納入のままのもの), および直径  $20\text{mm}$  の  $0.12\% \text{C}$  炭素鋼を  $910^\circ\text{C}$  で 1 時間焼鈍したもの の 2 種類を用いた。図 2 (a), (b) にそれらの組織写真を, 表 1, 表 2 にそれぞれの化学成分ならびに機械的性質を示す。



Fig. 2 (a) Microstructure of SM41A (as received). ( $\times 200$ )

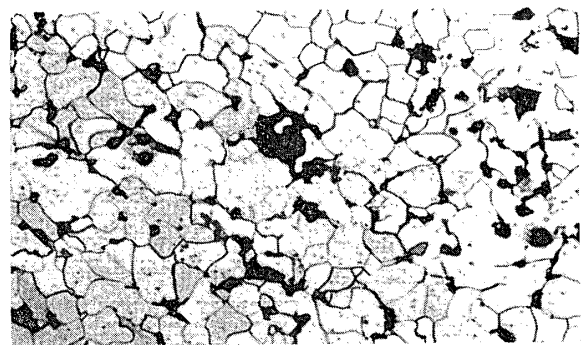


Fig. 2 (b) Microstructure of  $0.12\% \text{C}$ -Steel (as received). ( $\times 200$ )

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
Mild steel	S12C	0.120	0.160	0.500	0.002	0.006

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
S12C	30.6	44.5	34.4

2・2 実験方法ならびに実験装置

高温小野式回転曲げ試験機を使用し回転数は3400rpm一定とし、温度調節範囲は約300~850°Cで設定値よりの変動は±2°C以内に制御した。温度変動はタイマーを使用して加熱用電気炉と冷却用ブローアのスイッチを設定時間に交互にON-OFFにすることにより加えられた。温度はアルメル-クロメル熱電対を用いて測定し、回転時の雰囲気温度は試験片温度より高いので、予め試験片表面からの温度分布を測定し、その結果、一定温度分布をなすと考えられる表面から2mmの位置で雰囲気温度を制御した。図3に試験片表面からの炉中の温度分布を示す。一定温度試験の場合、荷重は温度が安定して5分後に加えた。

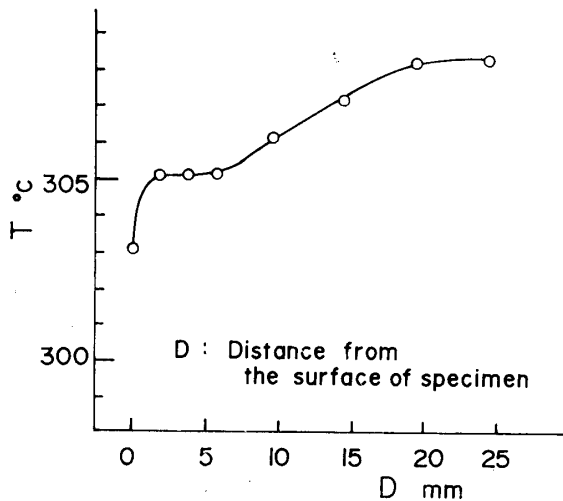


Fig. 3 Distribution of temperature in the furnace.

温度一定試験については、まずSM41Aを常温、150°C、300°C、400°C、500°Cの5種類の温度で、0.12% C炭素鋼については常温、200°C、300°C、350°C、400°C、450°C、550°Cの7種類の温度でそれぞれ疲労試験を行い繰返数10<sup>7</sup>回までの時間強度を

求めた。

2・3 温度変動モデル

温度変動試験については周期的温度変動モデルとして図4(a), (b), (c)の3つの型を設定し、以下これらを

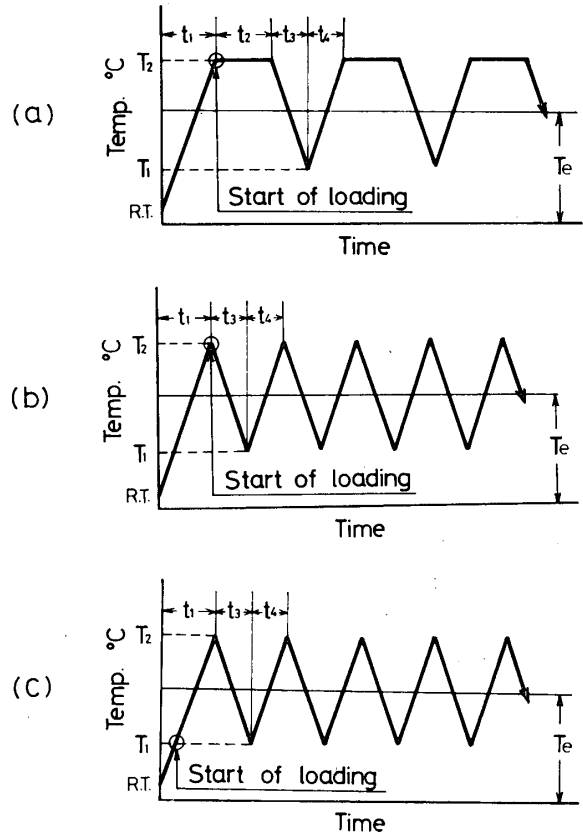


Fig. 4 Models of variation of temperature.

それぞれモデル(a), モデル(b), モデル(c)と呼ぶことにする。SM41A に対しては下限温度150°C, 上限温度400°Cにおいてモデル(a), (b), (c)の3つの型について、0.12% C炭素鋼に対しては下限温度200°C, 上限温度400°Cにおいてモデル(b), (c)の2つの型について、ともに一定連続荷重条件の下にそれぞれ実験を行った。

表3にモデルの立上り時間その他を示す。図5(a), (b)にモデル(a), (b)の記録例を示す。

Fig. 3 Numerical values of temperature and time.

Material	Symbol Model	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>
		°C	°C	min.	min.	min.	min.
SM41A	a	150	400	32.4	30.0	19.5	21.6
	b	150	400	32.4	0	19.5	21.6
	c	150	400	32.4	0	19.5	21.6
0.12% C-Steel	b	200	400	32.4	0	13.0	13.9
	c	200	400	32.4	0	13.0	13.9

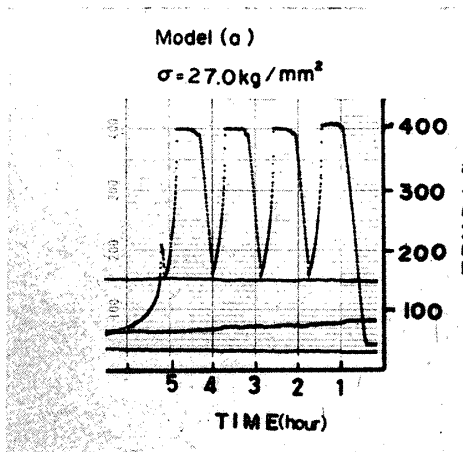


Fig. 5 (a) An actual datum for model (a).

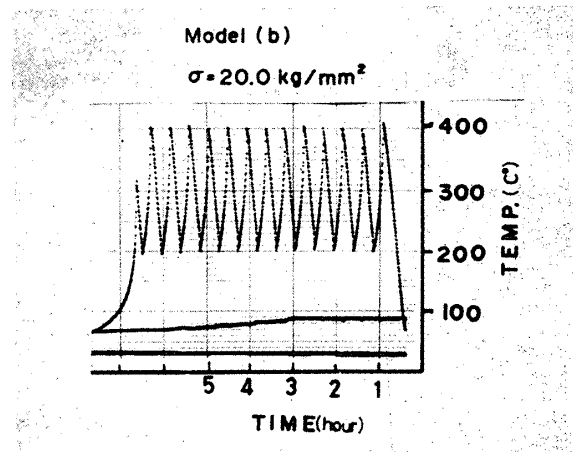


Fig. 5 (b) An actual datum for model (b).

3. 実験結果および考察

SM41A および0.12%C炭素鋼の一定温度試験の結果を図6, 図7に示す. それらに関する温度-時間強度 ( $T-S$ ) 線図を図8, 図9に示す. いずれの場合にも  $N=10^7$  における疲労強度は  $400^\circ\text{C}$  付近において最大値を示した.

次に温度変動試験に関して一定連続荷重, 周期的温度変動条件の下で破壊に至るまでに試験片に供給された熱量に相当する量を

$$\int_0^{\bar{N}} \alpha(N, T) T(N) dN$$

と置き ( $\alpha(N, T)$  は重み関数で繰返数  $N$  と温度  $T$  の関数), これと同一荷重条件で或る一定温度  $T_e$  の下で疲れ試験を行い, 同じ繰返数  $\bar{N}$  で破壊したと仮定すると, このとき供給された熱量に相当する量は  $T_e \cdot \bar{N}$  で (この  $T_e$  を以下, 相当温度と呼ぶ), 両者等しいとおくと

$$T_e = \frac{1}{\bar{N}} \int_0^{\bar{N}} \alpha(N, T) T(N) dN$$

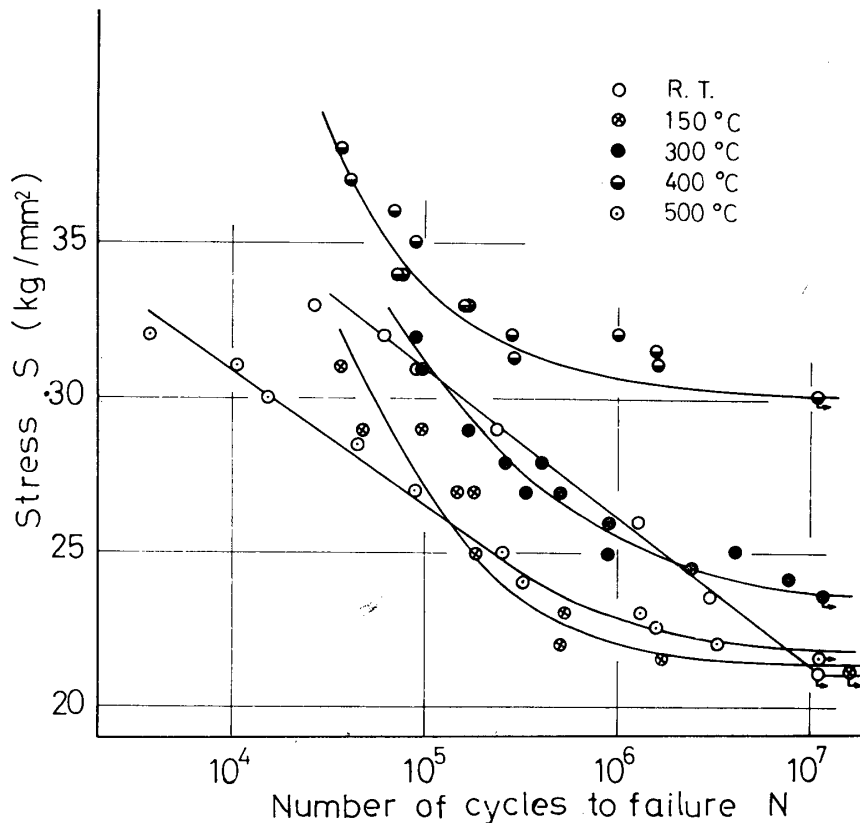


Fig. 6 S-N curves of SM41A (as received) at room temperature,  $150^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$  and  $500^\circ\text{C}$ .

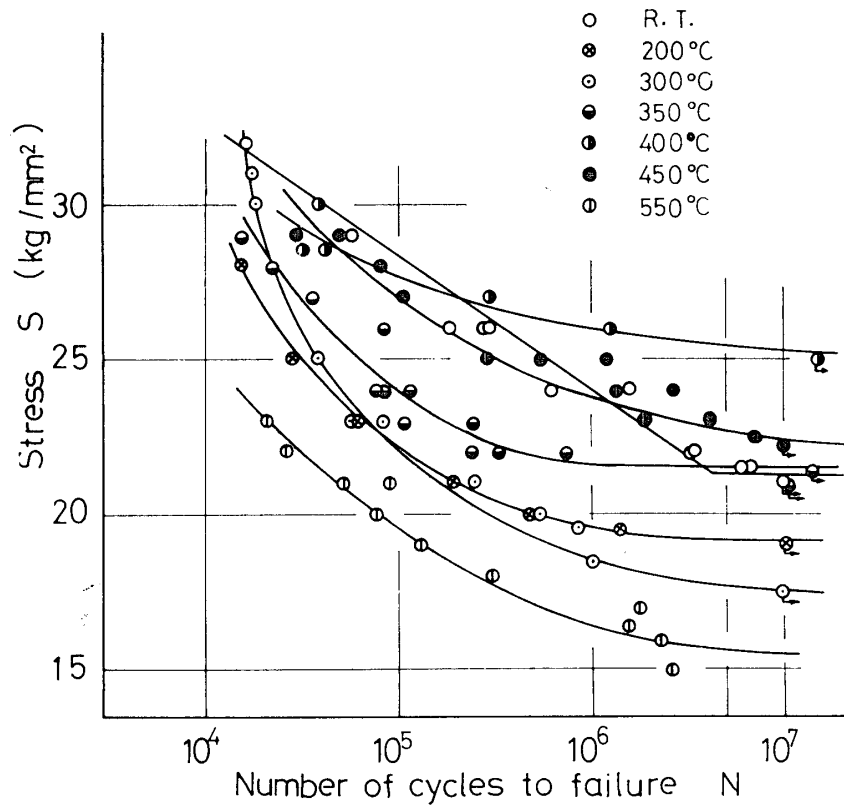


Fig. 7 *S-N* curves of 0.12% C-Steel (annealed) at room temperature, 200°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C and 550°C.

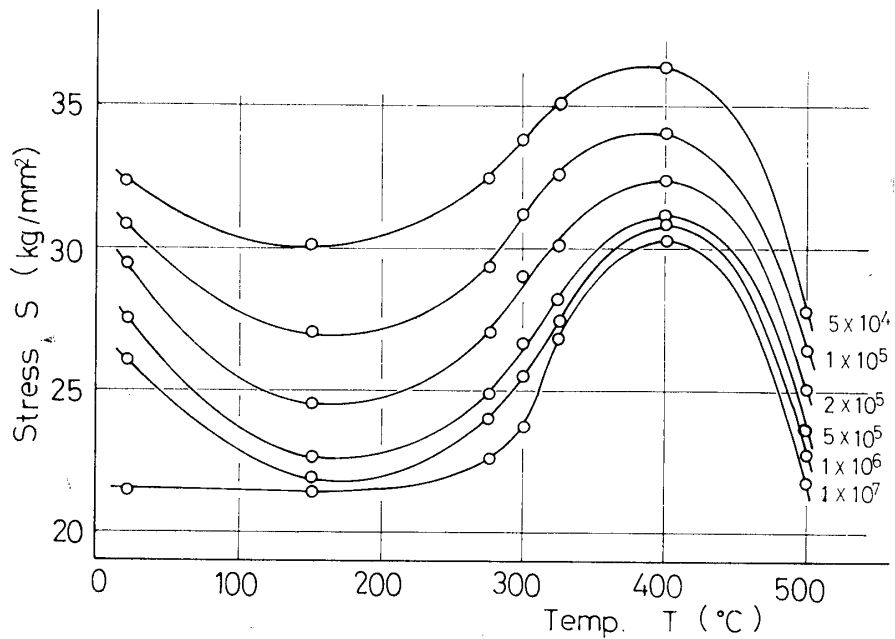


Fig. 8 Temperature versus repeated stress diagram with endurance strength as parameter (SM41A).

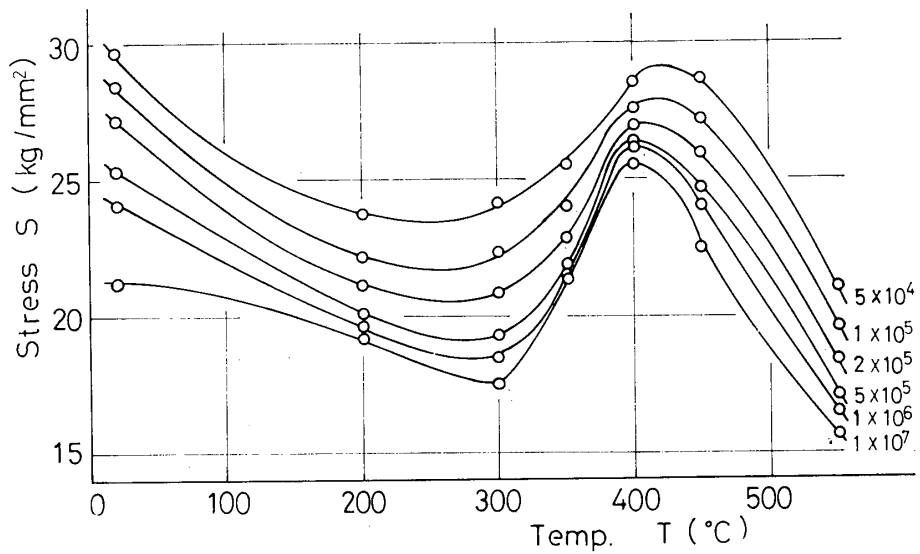


Fig. 9 Temperature versus repeated stress diagram with endurance strength as parameter (0.12% C-Steel).

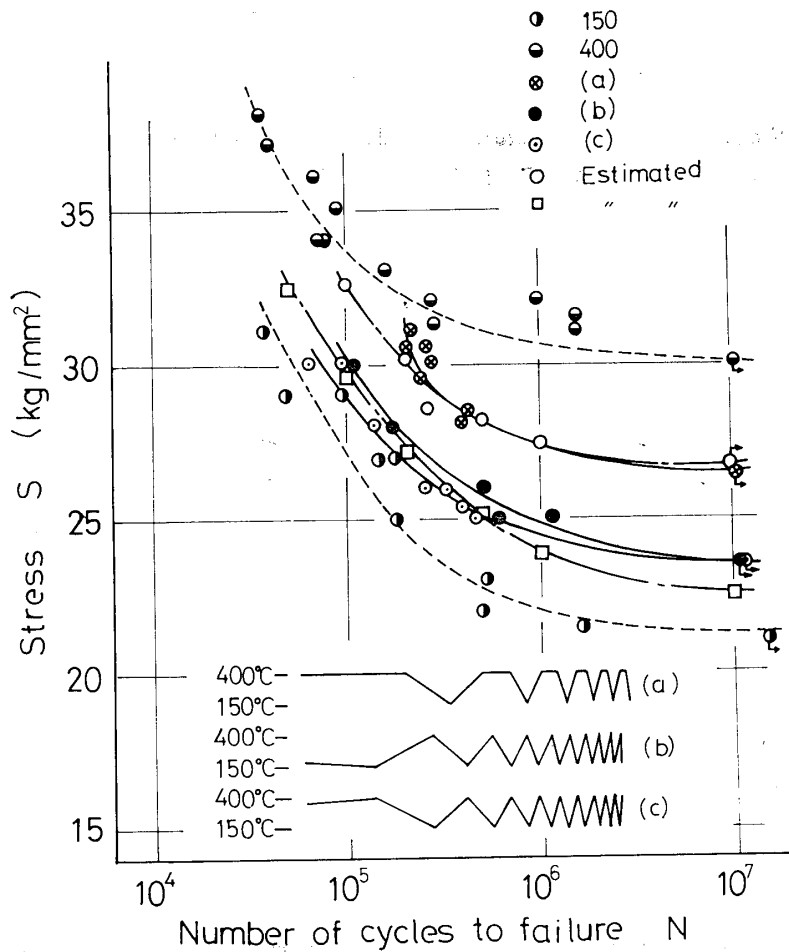


Fig.10 Comparison between  $S-N$  curves under cyclic variation of temperature and estimated  $S-N$  curves for equivalent temperature  $T_e$  (SM41A).

が得られる。いま、 $\alpha(N, T) = 1$  と仮定して、SM 41A について、図 4 (a)の温度サイクルに対する記録結果から相当温度を求めると  $T_e = 325^\circ\text{C}$  となり、図 8 の  $S-T$  線図より  $325^\circ\text{C}$  に対応する各時間強度を求めて、モデル(a)の実験値より得た  $S-N$  曲線に対応させてプロットすると図 10に示すような曲線になる。高温側より負荷を開始した影響が少しでているが、全体としてはよく(a)曲線上に載っている。

また SM41A について、モデル(b), (c)に対する相当温度を計算するといずれも  $275^\circ\text{C}$  となり、この温度に対応する各時間強度を同様に図 8 の  $S-T$  線図より

求め、図 10のモデル(b), (c)に対する  $S-N$  曲線 (これを(b), および(c)曲線と呼ぶことにする) に対応させてプロットした。(b), (c)曲線は  $10^7$  付近で全く一致し、 $S-T$  線図より求めた時間強度の推定曲線も(b), (c)の  $S-N$  曲線に略々一致した。

次に0.12% C炭素鋼に対するモデル(b), (c)に対する相当温度は  $300^\circ\text{C}$  となり、同様に図 9 の  $S-T$  線図より、 $300^\circ\text{C}$  に対する各時間強度を求め、それらの値をモデル(b), (c)の  $S-N$  曲線に対応させてプロットしたものが図 11である。両者は大体一致しているとみてよい。

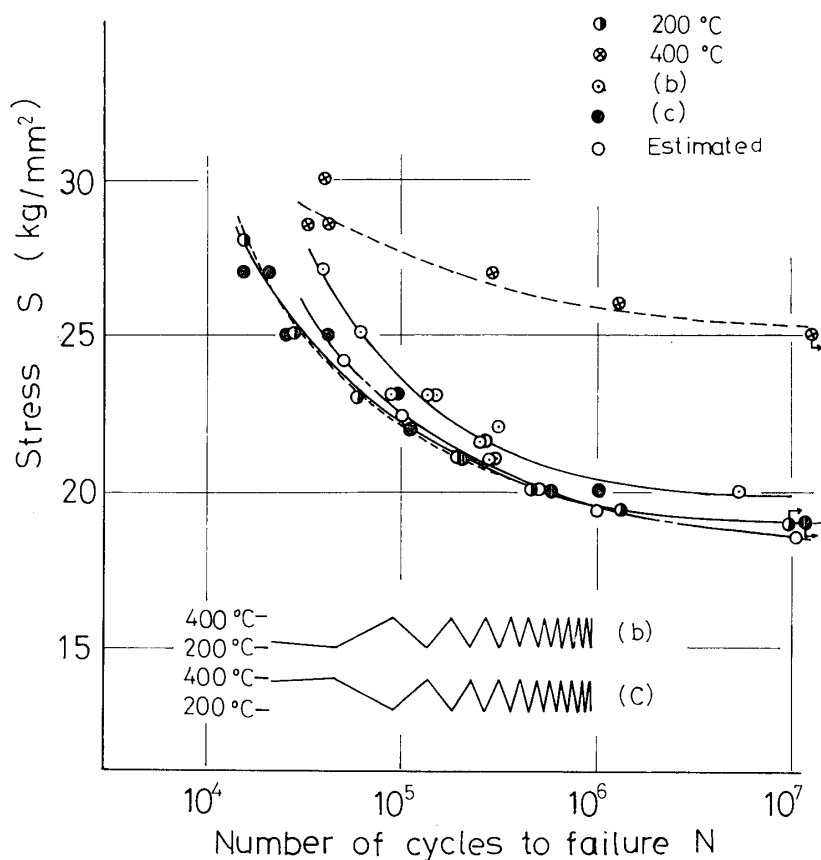


Fig.11 Comparison between  $S-N$  curves under cyclic variation of temperature and estimated  $S-N$  curves for equivalent temperature  $T_e$  (0.12% C-Steel).

図 12は SM41A の温度一定試験に関しての  $N = 10^6$  サイクル近傍における各温度に対する顕微鏡写真を、 $T-S$  線図の  $10^6$  曲線上の各点に対応させて示したものである。資料面の作製に当っては破断部より 10mm 離れた横断面を切断することにより破断の影響を除いた。上部の写真は表面より 0.3mm の位置で、下部の写真は中央付近の写真で表面より 2.5mm の位置で撮影したものである。繰返曲げ応力を受ける周辺部においては  $300^\circ\text{C}$  付近において最も多く滑り線が発生して

いることが観察され、この傾向は  $400^\circ\text{C}$  になるとずっと減少し、 $500^\circ\text{C}$  においては殆んどみられない。また中心部においては何れの温度についても滑り線は発生していない。

図 13(a)は SM41A に関する温度変動試験、モデル(a) (下限温度  $150^\circ\text{C}$ , 上限温度  $400^\circ\text{C}$ ) すなわち  $T_e = 325^\circ\text{C}$  に対する顕微鏡写真で、 $T = 325^\circ\text{C}$  の温度一定試験の写真(b)と比較したものである。(c), (d)は  $T = 150^\circ\text{C}$ ,  $T = 400^\circ\text{C}$  における温度一定試験の顕微鏡写

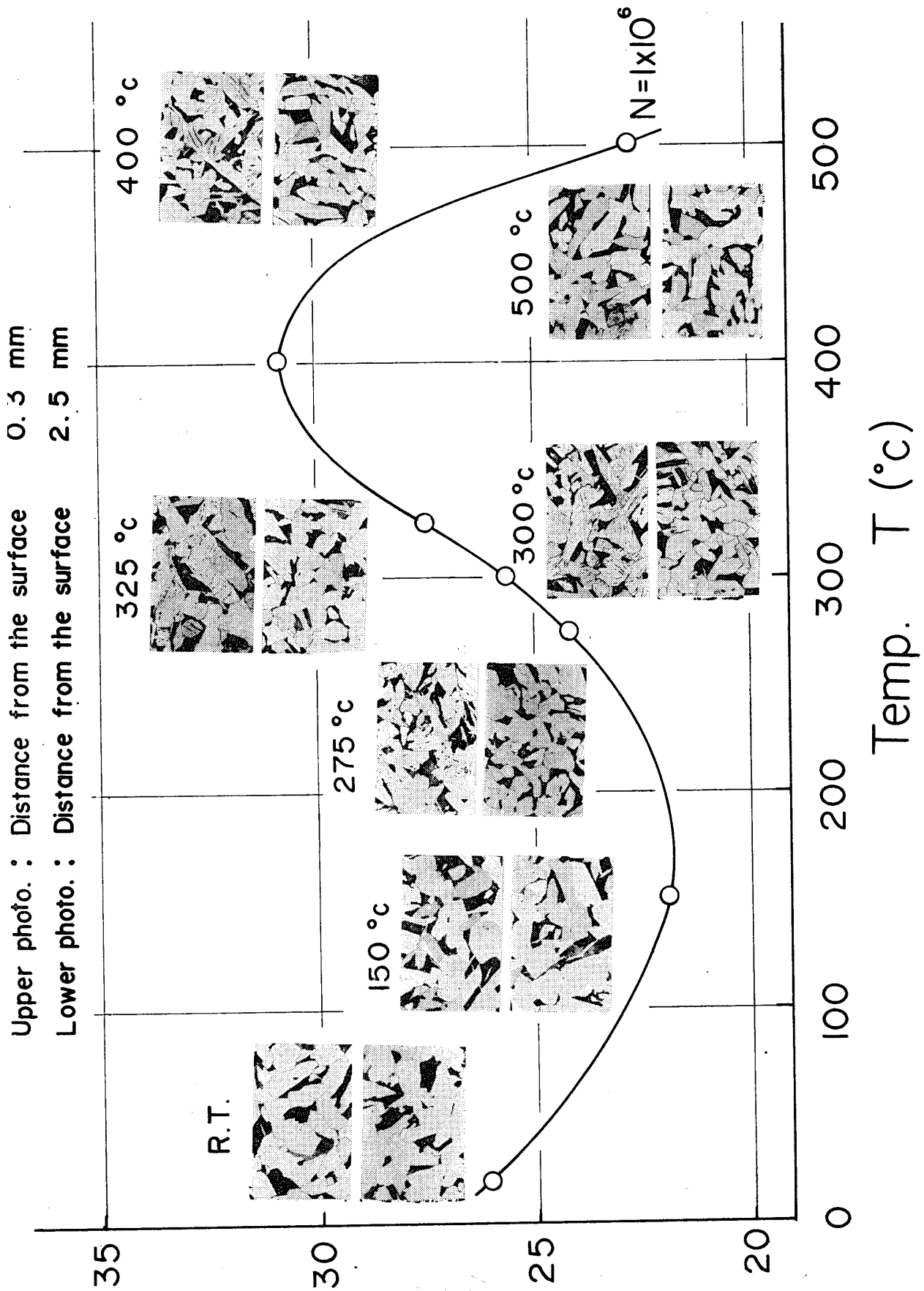


Fig.12 Microstructures of specimens for each temperature at the vicinity of  $10^6$  cycles under constant high temperature fatigue test for SM41A. ( $\times 100$ )



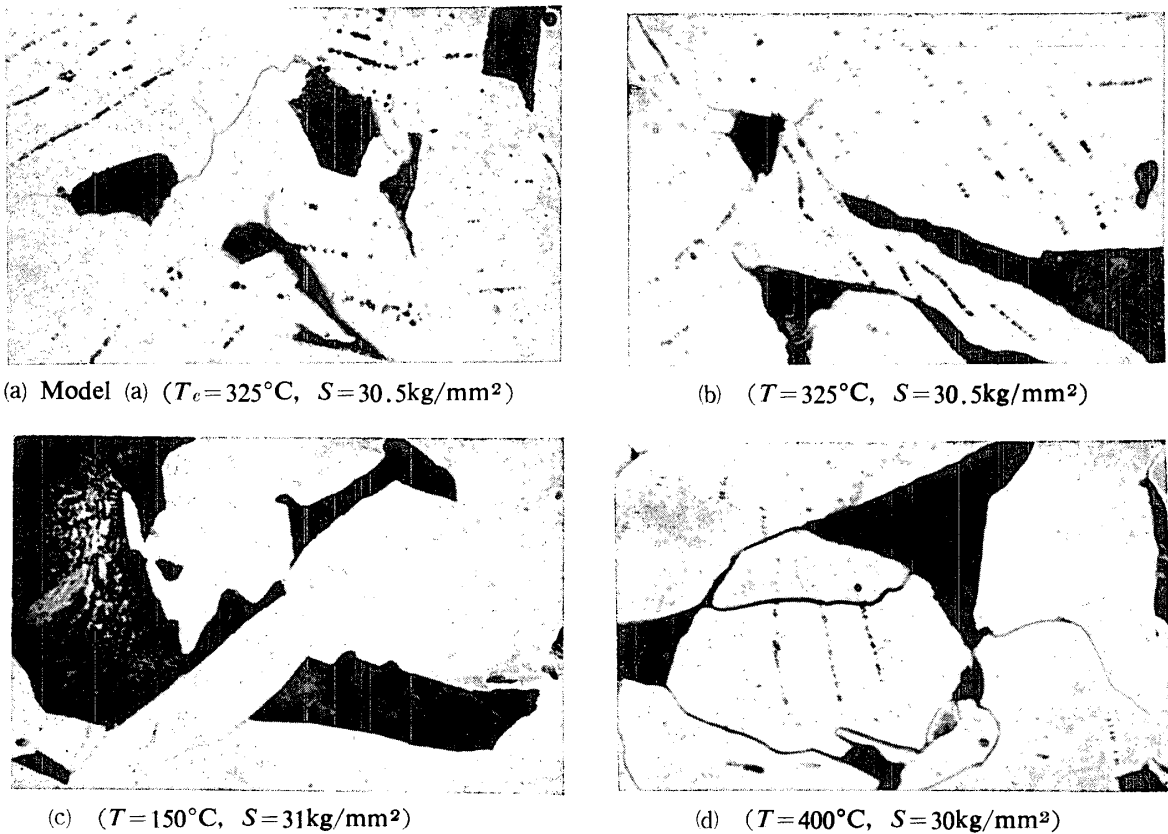


Fig.13 Microstructures of specimens under varying temperatures and constant temperatures for SM41A. (×560)

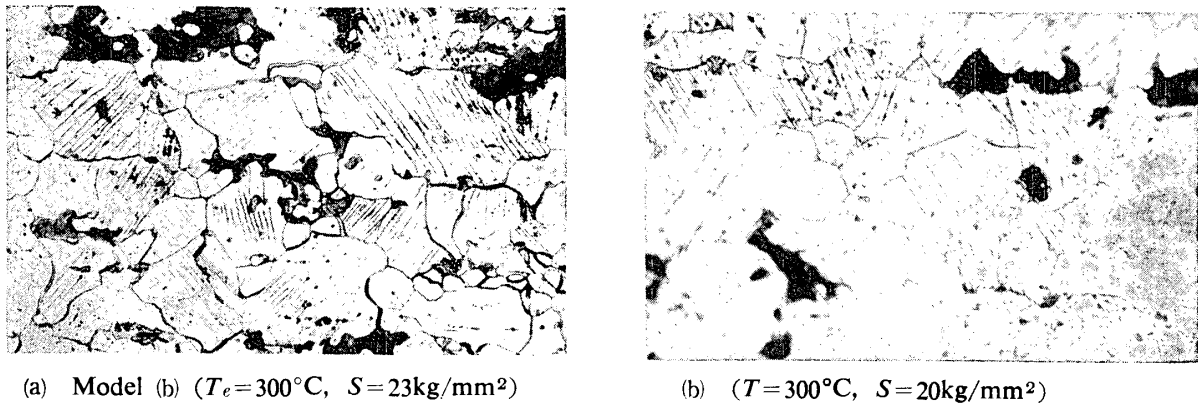


Fig.14 Microstructures of specimens under varying temperature and constant temperature for 0.12% C-Steel). (×280)

真で比較のために載せた。  $T_e=325^\circ\text{C}$  の温度変動試験に対する写真と  $T=325^\circ\text{C}$  の温度一定試験の写真は極めて良く一致している。

図14(a)は0.12% C炭素鋼に関する温度変動試験，モデル(b) (下限温度  $200^\circ\text{C}$ ，上限温度  $400^\circ\text{C}$ ) すなわち  $T_e=300^\circ\text{C}$  に対する顕微鏡写真で，  $T=300^\circ\text{C}$  の温度一定試験の写真(b)と比較したものである。両者は大体一致している。これらの顕微鏡写真の一致は前述の S

-N線図で両者がそれぞれ略々一致することを裏付けるものといえる。

#### 4. 結 言

時間強度をパラメータとして温度-繰返応力線図を実験的に求め、相当温度  $T_e$  を

$$T_e = \frac{1}{N} \int_0^N \alpha(N, T) \cdot T(N) dN$$

と定義し、 $\alpha(N, T) = 1$  と仮定して、この  $T_0$  に対する繰返応力を各時間強度について求めて得られた値は、温度変動下における  $S-N$  曲線と略々一致することが分った。なお上記の結果は顕微鏡写真でも、同一組織であることから裏付けられる。したがって、この実験結果に関する限り上記の温度—繰返応力線図より、変動曲線に対する疲れ試験の  $S-N$  曲線を推定することができるといえる。本実験に使用した以外の材料、たとえば耐熱鋼の場合や不規則な温度変動下における疲労強度に関しては  $\alpha(N, T)$  の値が問題になるが、この点に関しては次の機会にゆずりたい。

終りに材料の提供を賜った日本鋼管 K K, ならびに昭和46年および47年度機械工学科卒業生峯永敏基、沖村安則両君の労に対し、深甚なる謝意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本材料試験協会疲労部門委員会：材料試験 10, 76 (S 37—6) p. 628
- 2) 河本 実, 田中道七, 三宅光徳：機論集 27, 176 (S 36—4) p. 403
- 3) 平 修二, 村上裕則, 小寺沢良一：機論集 25, 159 (S 34—11) p. 1070
- 4) 安藤善司, 加藤容三, 中野典彦：材料試験 11, 105 (S 37—6) p. 379
- 5) L.F. Coffin : Experimental Mechanics, May, 1968, p. 218
- 6) N.P. Allen, P.G. Forrest : Inst. Conf. on Fatigue of Metal, 4 (1956) p. 327
- 7) 安藤善司, 加藤容三, 渡利彦四郎：機論集 22, 123 (S 31—11) p. 851
- 8) 河本 実, 石田武徳, 覚前英夫：材料試験 5, 30 (S 31—3) p. 161
- 9) 河本 実, 田中道七, 田淵修造：材料試験 9, 87 (S 35—12) p. 742
- 10) 河本 実, 田中道七, 中村秀夫：機論集 29, 206 (S 38—10) p. 1632
- 11) 西原利夫, 平 修二, 田中吉之助, 小寺沢良一, 東良学：機論集 24, 143 (S 33—7) p. 445
- 12) 平 修二, 小寺沢良一：材料試験 6, 45 (S 32—6) p. 401
- 13) 桜井忠一, 正木順一, 北本俊雄：材料 13, 131 (S 39—8) p. 625
- 14) 郡 利矩, 佐々木茂美：材料試験 11, 106 (S 37—7) p. 434
- 15) 林 建吉, 市田邦二：材料 19, 207 (S 45—12) p. 1098
- 16) L.F. Coffin, ASTM, STP, No. 165 (1954) p. 31
- 17) E.E. Baldwin, G.J. Sokol and L.F. Coffin, Proc. ASTM, Vol 57 (1957) p. 567
- 18) H. Majors, Trans. ASM, Vol. 51 (1959) p. 421
- 19) 平 修二, 小寺沢良一, 大南正瑛：材料試験 9, 85 (S 35—10) p. 636
- 20) 平修二, 藤野宗昭, 土師隆：材料 22, 234 (S 48—3) p. 235
- 21) 加藤則忠：機論集 27, 176 (S 36—4) p. 410
- 22) 平修二, 藤野宗昭, 土師隆：材料 22, 233 (S 48—2) p. 110
- 23) 遠藤吉郎：材料試験 10, 95 (S 36—8) p. 598
- 24) 河本実, 田中道七, 中村秀夫：材料試験 11, 105 (S 37—6) p. 374
- 25) J.W. Berry, NASA MEMO, 11—21—58W (1958) p. 20
- 26) J.A. Dunsby, ASTM, Proc., 65, (1965) p. 736
- 27) A.B. Малвквич, Т.К. Маринец, В.М. Рахман, Извест ВУЗ Машиностр., 12, (1964) p. 39

(昭和48年9月17日受理)