

蒸気タービンケーシング用材料の熱疲労強度

Thermal Fatigue Strength of Steam Turbine Casing Materials

楠 本 韶*
Shō Kusumoto

内 容 梗 概

火力発電用の蒸気タービンケーシングの経年き裂の原因の一つと思われる繰返し熱ひずみによる疲労、いわゆる熱疲労に対する強度をケーシングに用いられる 1Cr 1Mo 1/4V 鋳鋼をはじめとする二、三の鋼材について実験的に検討した。その結果、熱ひずみサイクル中に生ずる塑性ひずみと寿命との間に密接な関係のあることが認められた。また、鋳鋼は一般に 18Cr 8Ni ステンレス鋼に比べて少ない塑性ひずみの繰返しで破壊するが、たとえば 1Cr 1Mo 1/4V 鋳鋼では降伏点が高いために、塑性ひずみの量が少なく、そのために寿命が長くなるという利点のあることがわかった。

1. 緒 言

高温で使用される機械部品では、ときとして塑性変形を伴うような大きな熱ひずみの繰返しによる疲労、いわゆる熱疲労によるき裂の発生をみることがある。火力発電用の蒸気タービンケーシングで以前から問題になっている経年き裂もやはりこれが大きな原因となっていると考えられ、これまでも設計や材料の面で種々の対策がなされてきた。熱疲労の問題は近年国内外ともに注目され、研究が進められてはいるが、これまで発表された資料は非常に少なく上記の対策に役立つような資料はまだ得られていない。本研究はこれを補って対策をより効果的にするために行ったものであって、最近の大容量タービンに用いられている 1Cr 1Mo 1/4V 鋳鋼のほか二、三のごく基本的な鋳鋼およびステンレス鋼について熱疲労強度の検討を行ったものである。なお本実験に用いた装置はアメリカ G.E. 社の L. F. Coffin 氏⁽¹⁾が原子炉用材の熱疲労の研究に用いた方式によるものであって、電気炉が不要のため試験片の観察や応力、ひずみの測定が容易なことなどほかの装置にみられない利点があるので採用した。

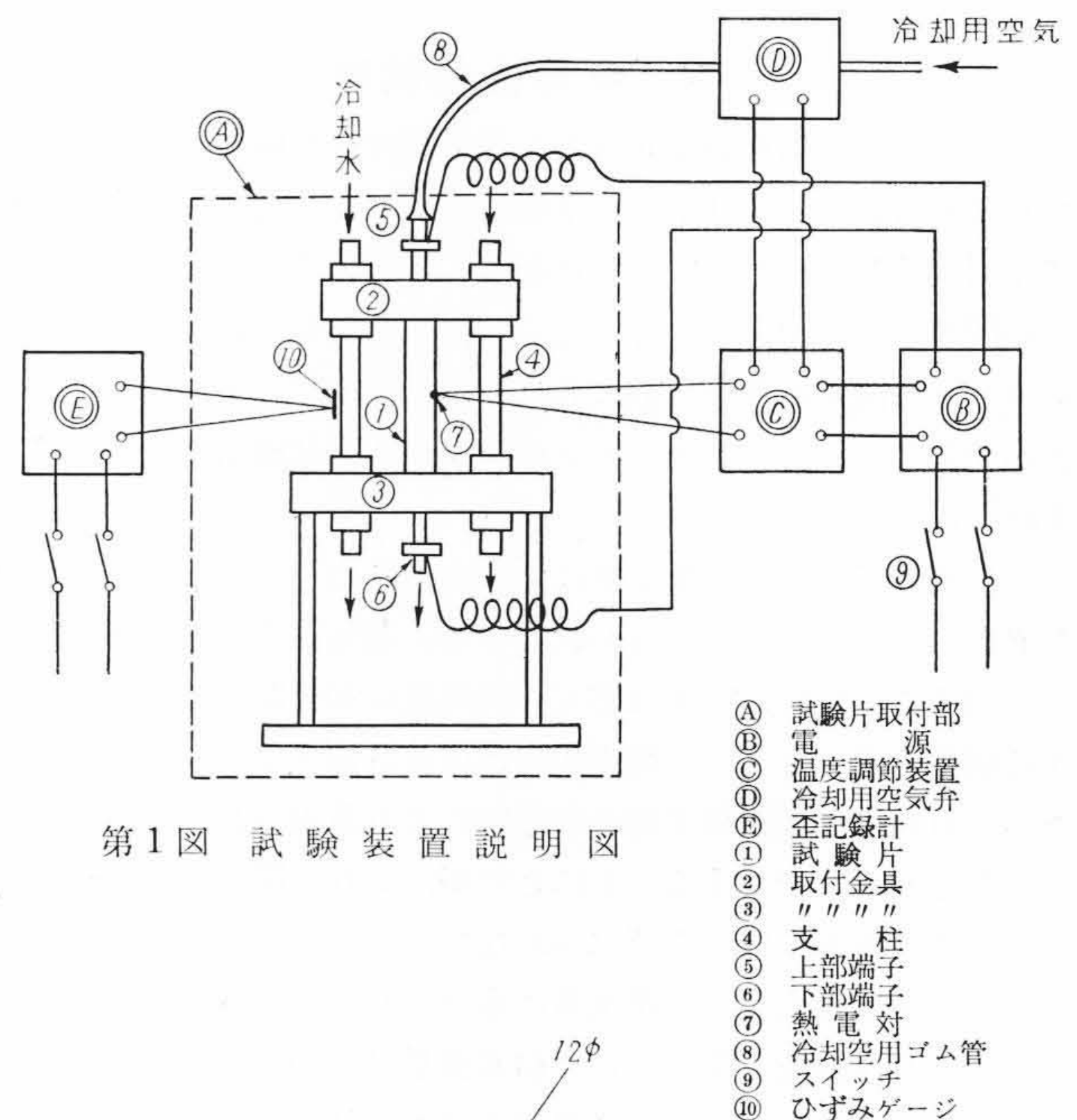
2. 実 験 方 法

2.1 概 説

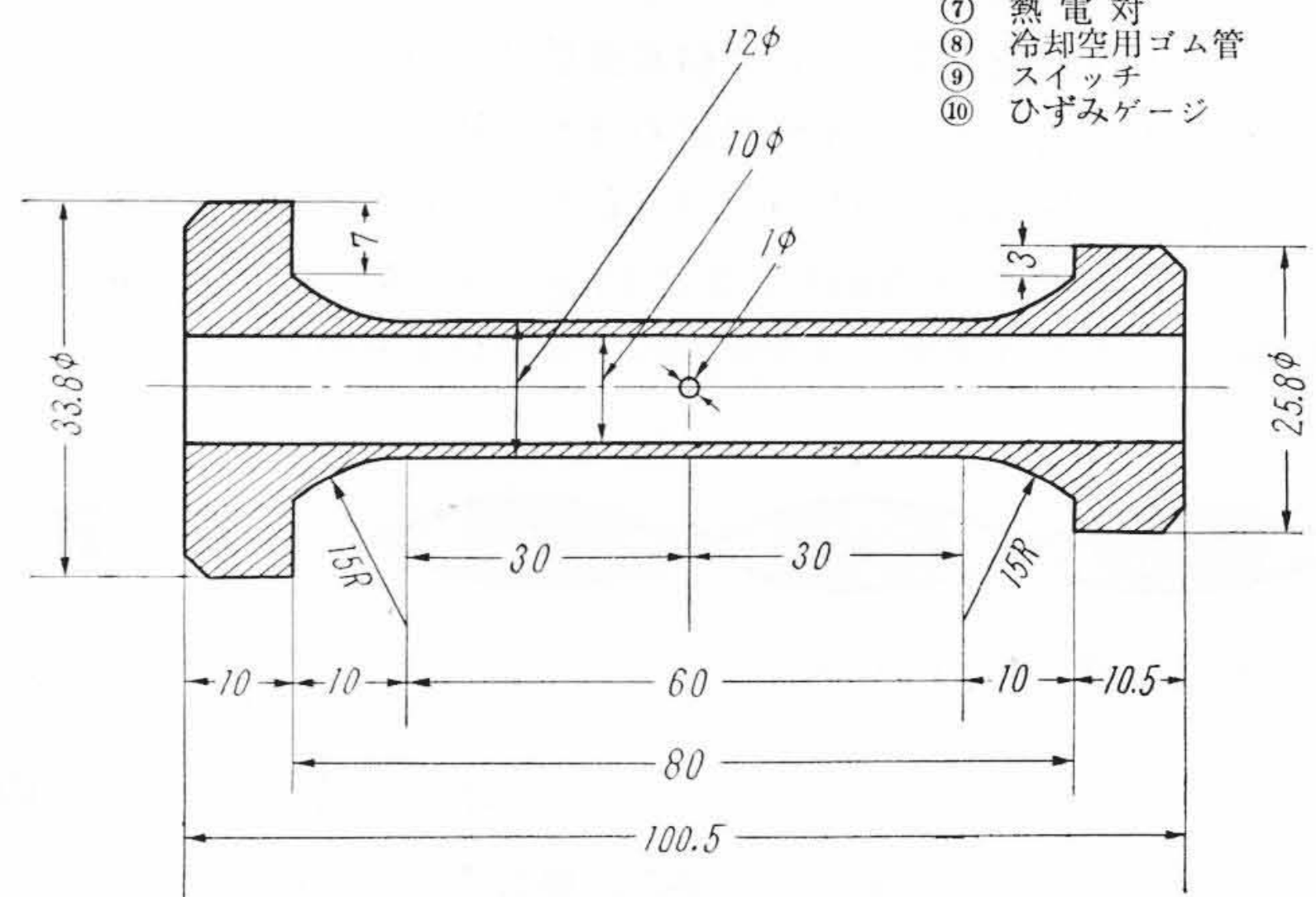
後述するように本実験では外径 12mm、内径 10mm、長さ 100mm の管状試験片の両端を固定して試験片に電流を通じて加熱し、ついで電流をとめて冷却するという方法で、加熱冷却の温度サイクルを与えた。熱膨張による伸縮が阻止されているため、試験片には熱ひずみが生じ、その量が多ければ比較的少数回でき裂が発生する。種々の温度サイクルのもとで試験片に生ずるひずみを測定し、これとき裂発生までのサイクル数との関係や材質による差異などを調べた。

2.2 試験装置

第 1 図は試験装置の説明図である。図中①には第 2 図のような中空の試験片が取付けられる。試験片は中央に 2 個の丸穴のある有孔試験片と穴のない平滑試験片とを用いた。試験片は旋盤で仕上げたが少数個は内面のみホーニング仕上げを行った。第 1 図で①の試験片両端は取付金具②、③に固定され、②、③は 2 本の支柱④で結合されている。①の両端は端子⑤、⑥を介して電源⑧につながっていて、電流が流れると①は①自身の抵抗で加熱される。②③と④間は絶縁されていて④には電流が流れない。①の中央には熱電対⑦が熔接されていて試験片の加熱冷却の制御は⑦を介して制御装置⑨によ



第1図 試験装置説明図

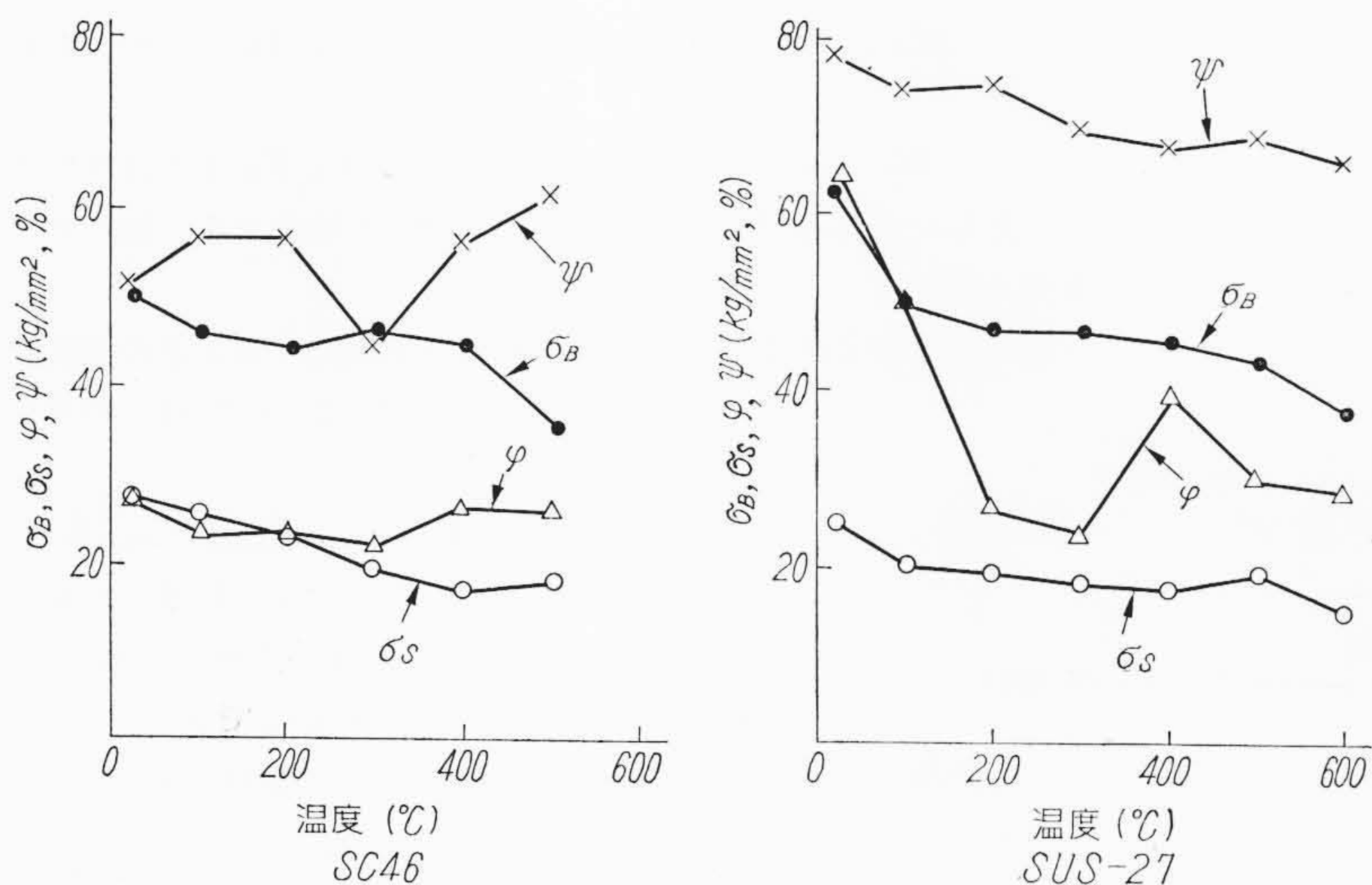
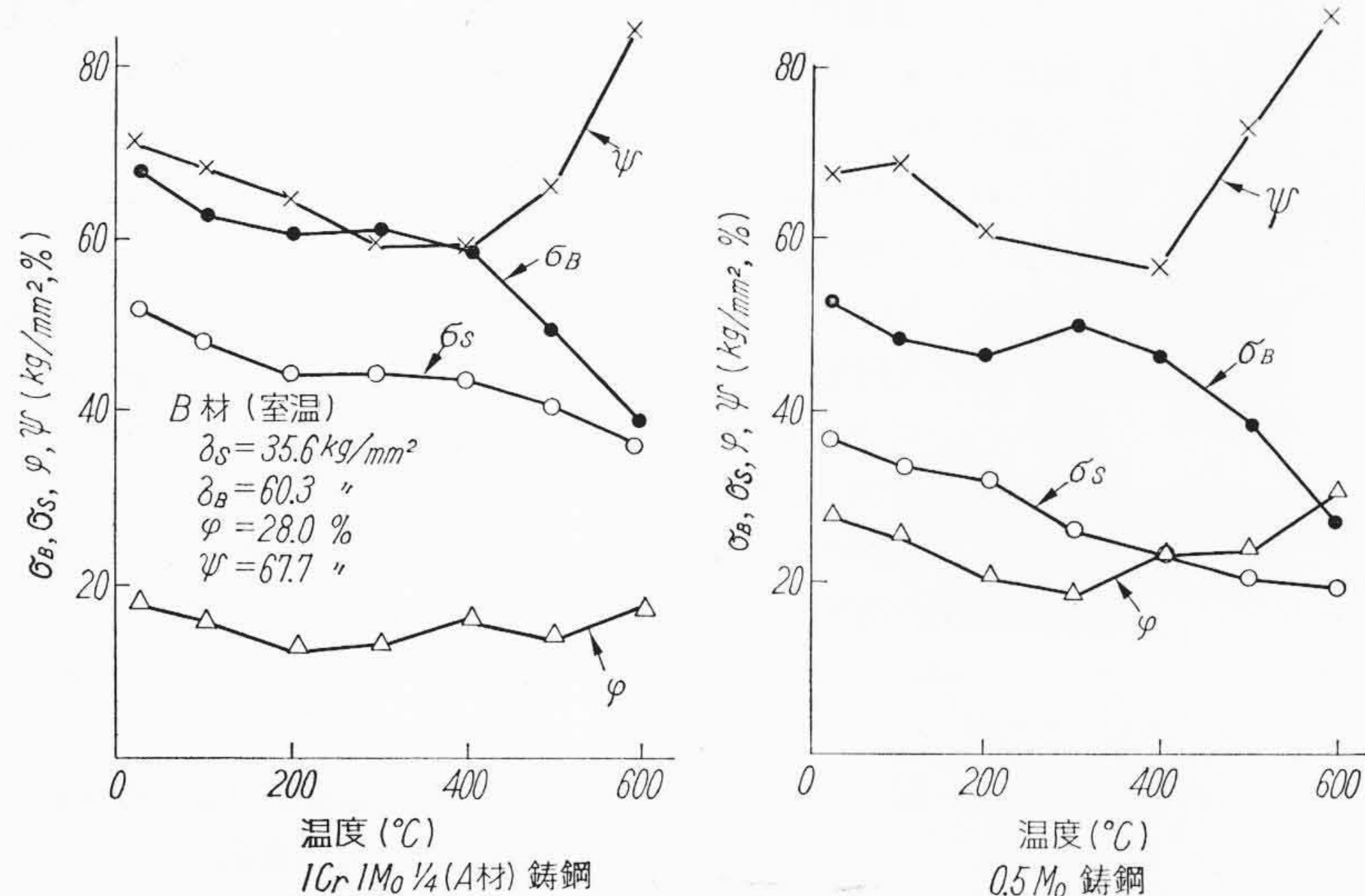


第2図 試験片の寸法



第3図 熱疲労試験機の外観

* 日立製作所日立研究所



第4図 材料の機械的性質

第1表 材料の化学成分 (単位: %)

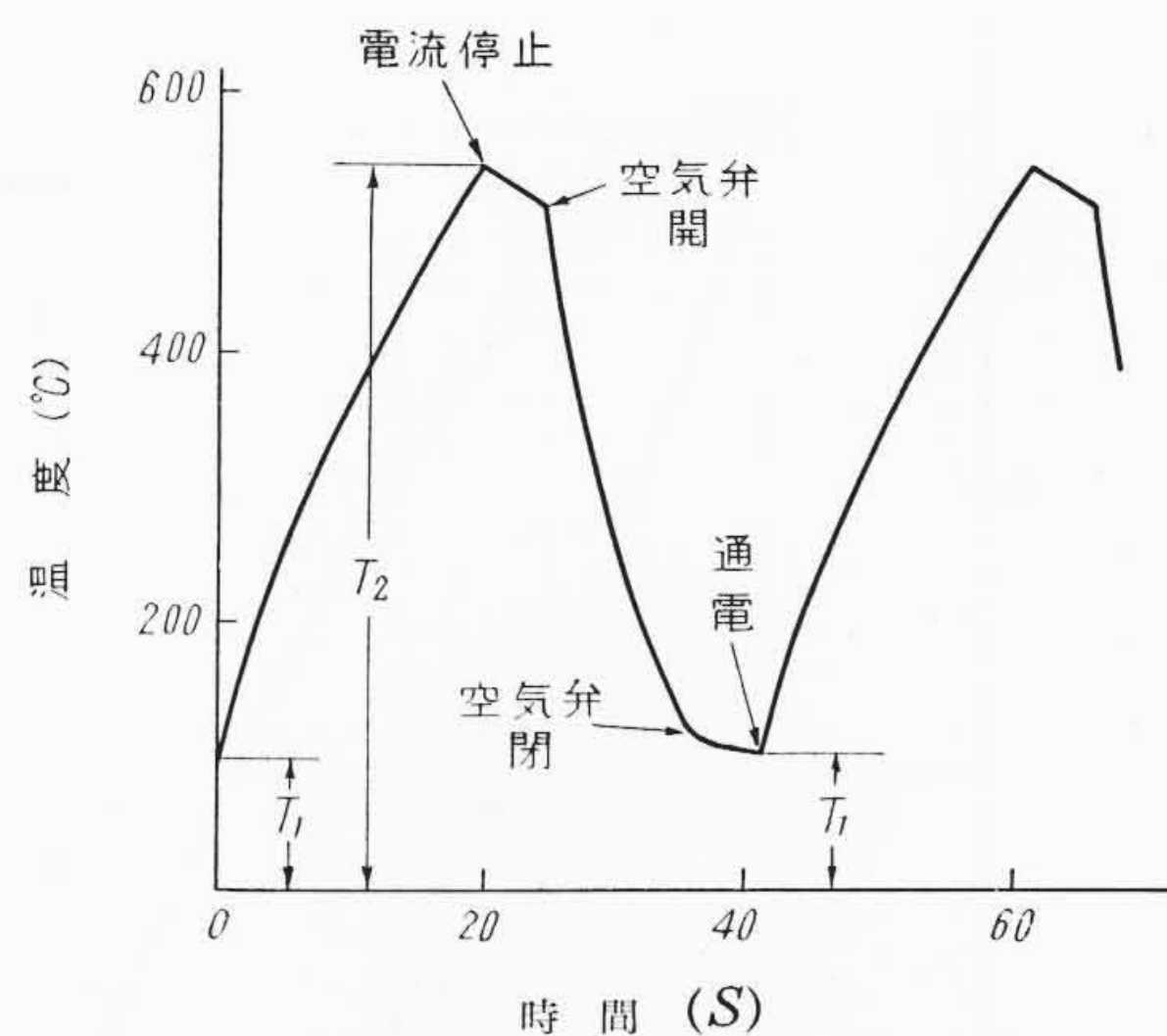
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
SC 46	0.29	0.48	0.74	0.012	0.003	0.20	0.07	0.11	—	—
0.5 Mo 鋳鋼	0.19	0.37	0.61	0.006	0.005	0.19	0.04	0.05	0.64	—
1Cr1Mo1/4V* (A材B材)鋳鋼	0.19	0.43	0.61	0.006	0.008	0.12	0.08	0.90	1.01	0.30
SUS 27	0.07	0.49	0.95	0.009	0.009	—	8.87	19.92	tr	tr

* B材はA材を再熱処理したもの

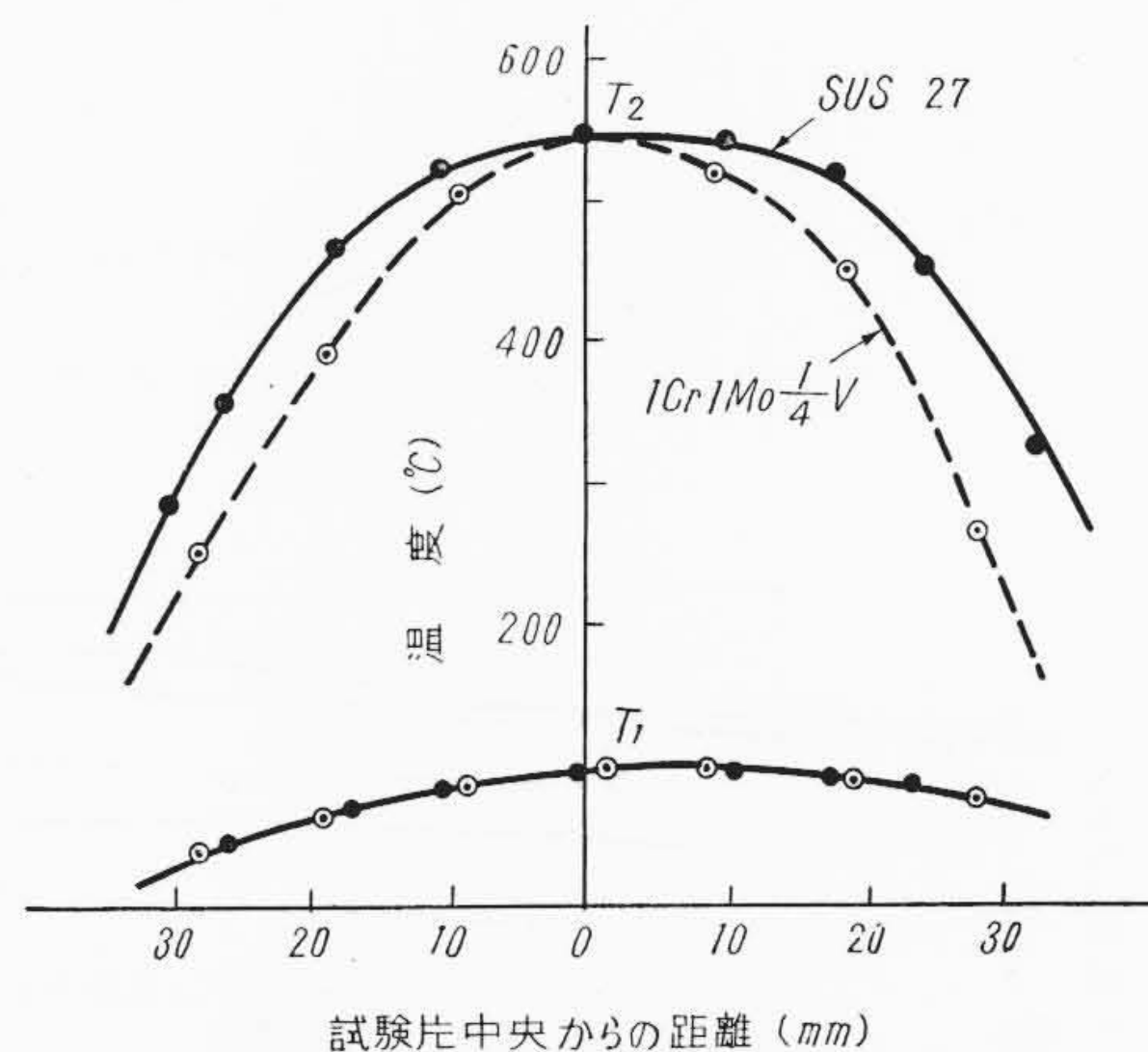
て行われる。①の伸縮は④によって阻止されるので①には加熱冷却により圧縮と引張りの力が生じ④にはこれと同量の引張りと圧縮の荷重が加わる。④の荷重はひずみゲージ⑩を通じてひずみ記録計⑪に記録される。ひずみゲージは8枚使用して各支柱の不均衡荷重、曲げモーメントおよび温度変化の影響が入らないように結線してある。また④は中空であり、中にたえず水を通してひずみゲージの感度に対する温度の影響を少なくする。第3図は試験機の外観を示す。

2.3 供試材料

供試材料はタービンケーシングに用いられる1Cr1Mo1/4V鋳鋼など3種の鋳鋼の他に参考として18Cr8Niステンレス鋼SUS27を用いた。化学成分は第1表に、各温度における材料の機械的性質は第4図に示す。第1表においてCrMoV鋼のA、B材は同じ材料で熱処理のみを異にしており、B材は第4図中に例記したようにA材よりも降伏点、引張強さが低い。同図は供試材料の各温度における機械的性質を示しているがCrMoV鋼A材は他の鋼種に



第5図 試験片中央の温度変化



第6図 試験片の温度分布

比べて降伏点および引張強さがかなり高いことがわかる。

2.4 試験片の温度、応力およびひずみの測定

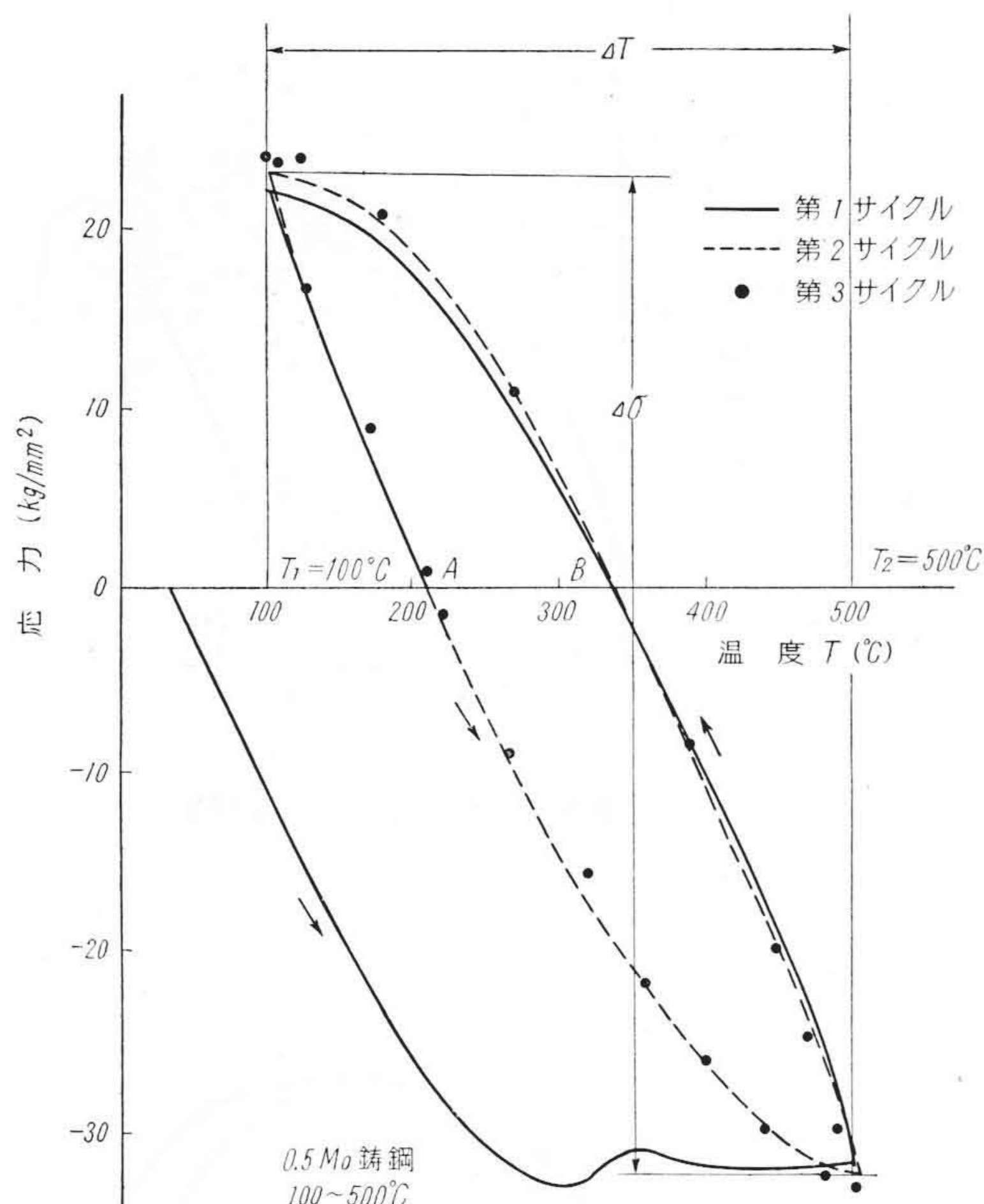
(a) 温度

第5図は試験片の中央部で測定した1サイクル中の温度の変化である。1サイクルの所要時間は下限および上限の温度 T_1 、 T_2 の値、電圧そのほかにより差があるが、 $T_1=100^\circ\text{C}$ 、 $T_2=500^\circ\text{C}$ の場合には約40secとなるように調整した。試験片の温度分布は一樣でなく、第6図のとおり中央部で最も高く両端に近いほど低い。また鋳鋼はSUS27に比べて熱伝導率が大いので試験片の両端からの熱の逃げが多くそのため中央と両端との温度差が大きい。ただし下限温度では両者にあまり差がみられない。また中央部20mmの範囲では温度分布はほぼ一樣と考えてよいであろう。

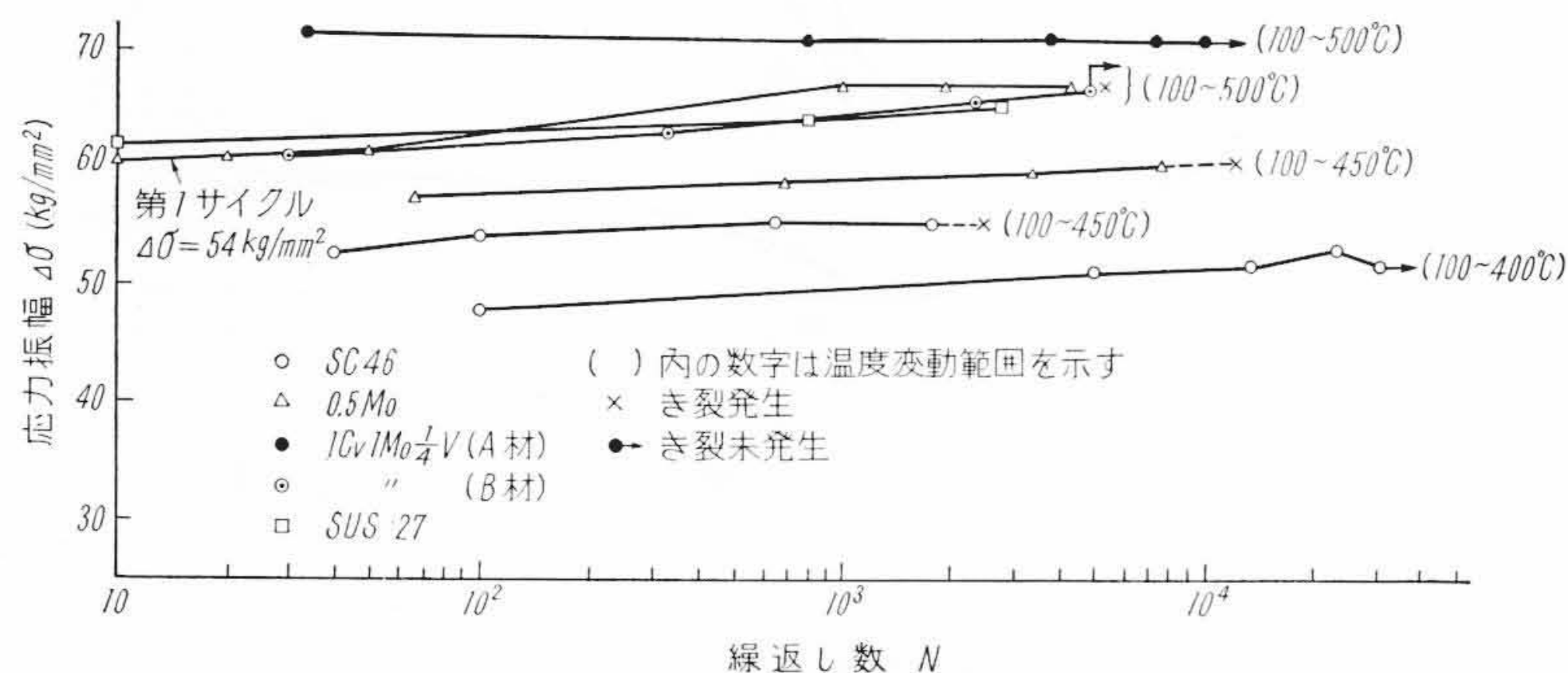
なお、以下の文中で試験片の温度 T_1 、 T_2 は試験片の中央における温度を表わすものとする。

(b) 応力

試験片の応力は支柱に加わる荷重がひずみ計によってわかるのでこれを試験片の断面積で除してただちに求められる。また試験中の荷重はペン書きのひずみ記録計で記録した。平滑試験片ではき裂の進展速度が大いいために、き裂発生後は試験片の有効断面積が急速に減少して荷重振幅も比較的急速に減少しはじめるから、記録紙上でき裂発生までのサイクル数 N が容易にわかる。以下の文中では便宜上この破断繰返し数を N と書くことにする。な



第 7 図 温度と応力との関係



第 8 図 繰返し数と応力との関係

お有孔試験片ではき裂発生初期のき裂の進展速度が非常にゆるやかなために荷重振幅の減少もゆるやかなことが多く、温度振幅 $\Delta T = T_2 - T_1$ が大きくてき裂の進展が急な場合を除いて、記録紙上での N の測定は不可能であった。このような場合にはき裂の発生を倍率 50 倍程度の顕微鏡によって観察し N を決定した。

(c) ひずみ

与えられた熱サイクルのもとで試験片に生ずるひずみはこの実験ではとくに重要な量であるが、測定は次のようにして行った。

(i) 試験片の標線間の距離を L とすれば 1 サイクル中の L 間のひずみの変化の最大幅(ひずみ振幅)には次の関係がある。

$$\Delta \varepsilon_t = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_p + \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\Delta \varepsilon_t$: 伸縮が拘束されていない試験片の熱膨脹による L 間のひずみ振幅

$\Delta \varepsilon_e$: 拘束されている試験片の熱応力による弾性ひずみ振幅

$\Delta \varepsilon_p$: 拘束されている試験片の L 間の塑性ひずみ振幅

ΔL : 拘束された試験片上の L の両端の標線の変位の振幅

(1) 式の諸量のうち $\Delta \varepsilon_t$, ΔL はダイヤルゲージまたは測微顕微鏡などにより測定することができる。また $\Delta \varepsilon_e$ は弾性係数 E と応力振幅 $\Delta \sigma$ とから計算することができるので、同式から $\Delta \varepsilon_p$ が求められる。ただ前述のように試験片の長さ方向の温度分布が一様でないため塑性ひずみの分布も不均一となっていることが多く、 L のとり方によって $\Delta \varepsilon_p$ の値が異なってくる。また弾性係数の値についても問題が残る。実験の初期には上述の方法で試験片の全長について $\Delta \varepsilon_p$ の平均値を求めたが、のちには E の値の仮定による誤差をさけるために次の方法で測定した。

(ii) 試験片の温度 T_A と T_B とにおける標線距離 L の変化量の間には次の関係がある。

$$\delta L_t = -\delta L_e - \delta L_p + \delta L \dots\dots\dots (2)$$

ここで

δL_t : 拘束されていない試験片の温度が T_A から T_B になったときの熱膨脹による L の変化

δL_e : 拘束された試験片上の L の T_A , T_B での弾性変形の差

δL_p : 拘束された試験片上の L の T_A , T_B での塑性変形の差

δL : 拘束された試験片上の L の T_A , T_B での長さの差
ただしいずれも T_A から T_B の間で伸びる場合を正、縮む場合を負とする。

温度上昇および下降の際に応力 0 の点を通過するときの温度をそれぞれ T_A , T_B に選べば (2) 式で δL_e の項が 0 となるから

$$\delta L_p = -\delta L_t + \delta L \dots\dots\dots (3)$$

である。また T_A , T_B をこのように選んだ場合には δL_p は半サイクル間の塑性変形であるから、その絶対値 $|\delta L_p|$ が塑性変形振幅であり、したがって標線距離 L 間の塑性ひずみ振幅 $(\Delta \varepsilon_p)_L$ は

$$(\Delta \varepsilon_p)_L = \frac{1}{L} |\delta L_p| = \frac{1}{L} |-\delta L_t + \delta L| \dots\dots\dots (4)$$

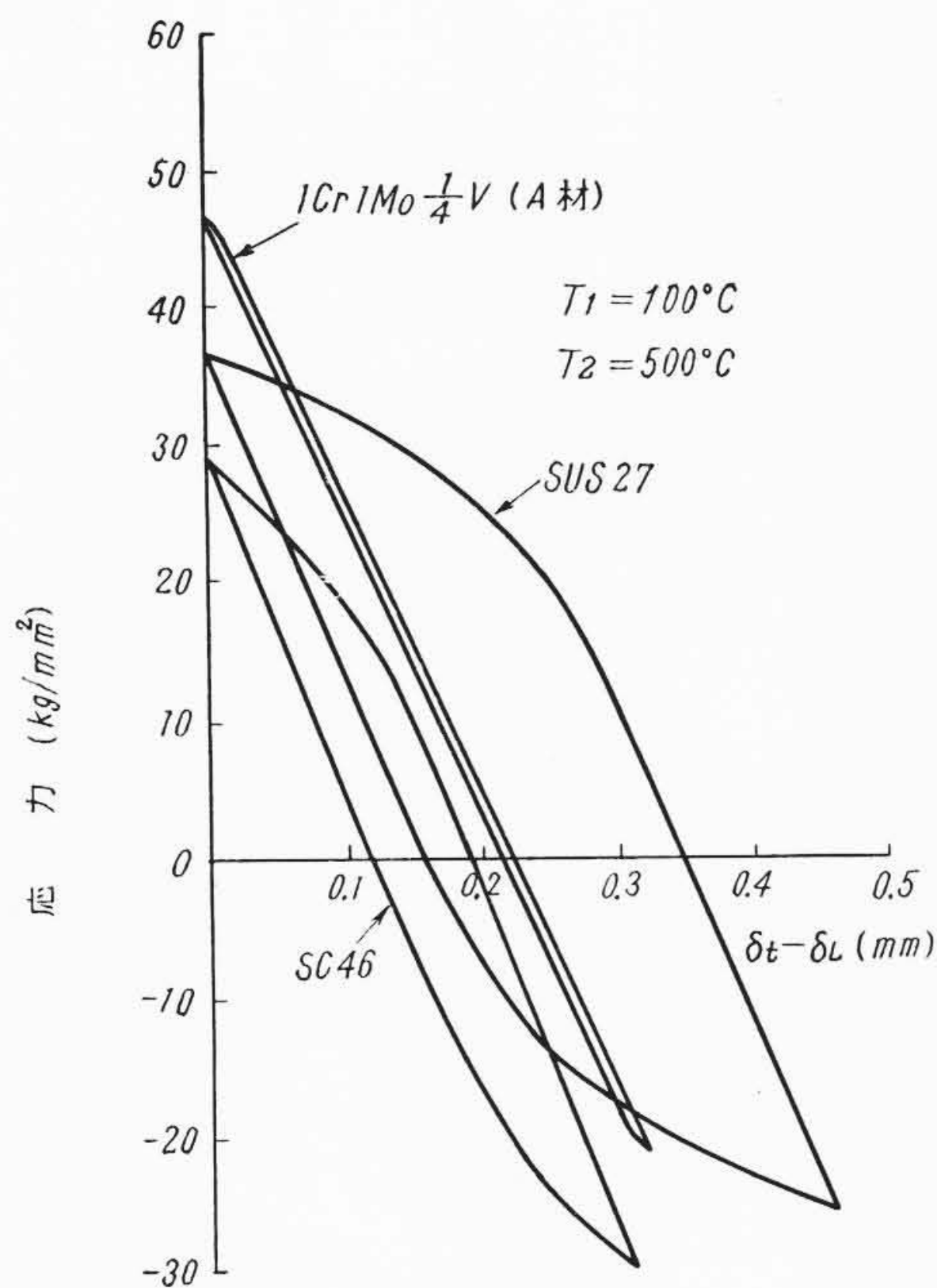
である。この方法によって $\Delta \varepsilon_p$ を求める場合に、 L を試験片の全長(実際には平行部 $L = 72 \text{ mm}$)に選んだ場合には δL_t , δL をダイヤルゲージおよびオシログラフによる記録から求めたが、ひず

みの集中を調べるために試験片の中央部の比較的温度分布が均一な $L = 20 \text{ mm}$ 間について行った測定では、測微顕微鏡(倍率 $\times 130$)の目盛上での標線の動きからこれらの値を求めた。

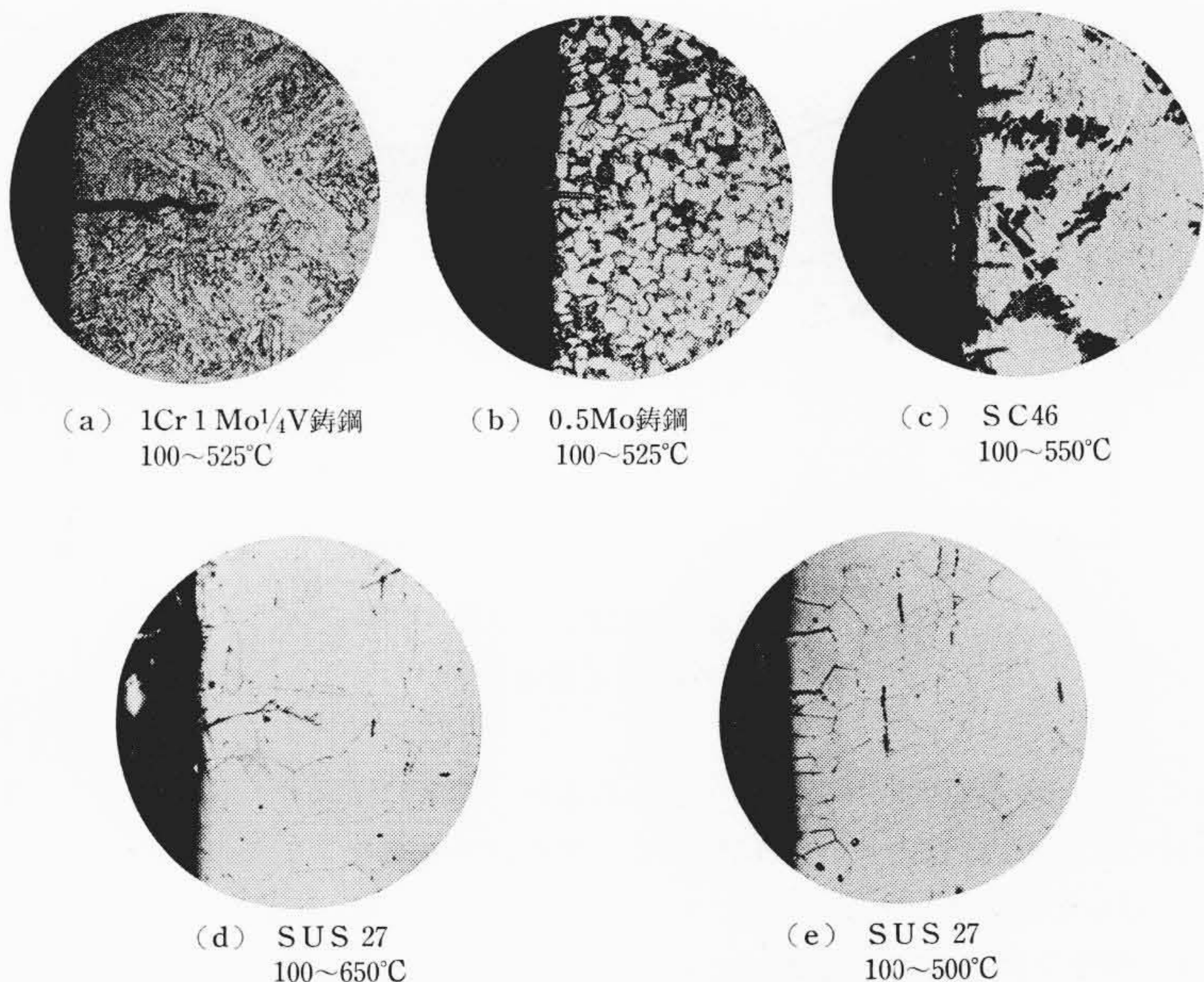
3. 実験結果と検討

3.1 応力およびひずみ

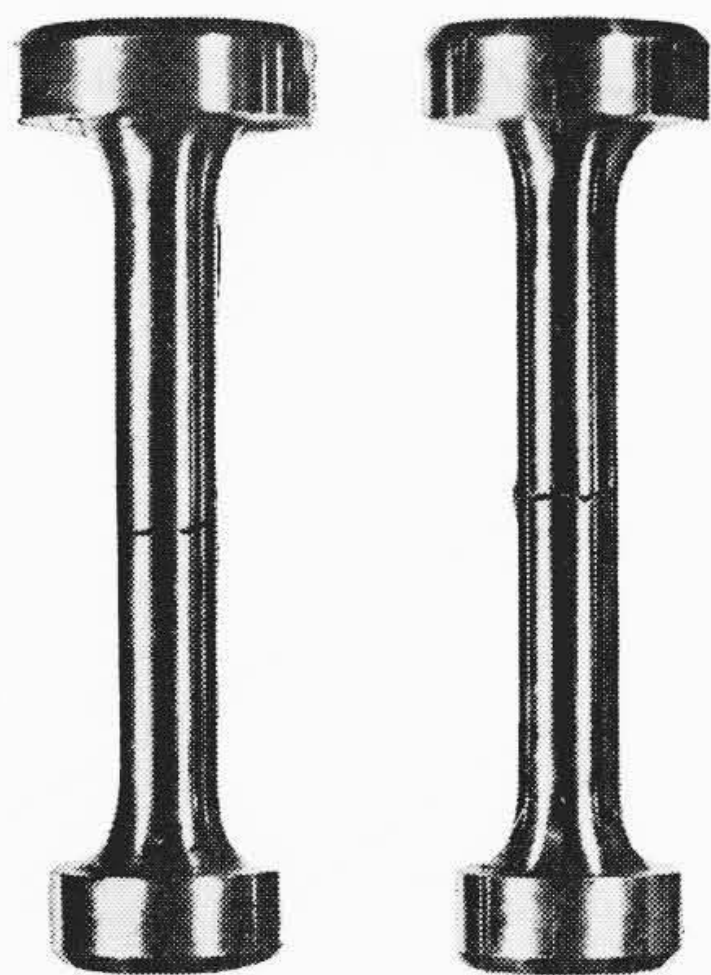
試験片はすべて室温で取り付けて実験を行った。試験片の温度と応力との関係の一例を示すと第 7 図のとおりであり、第 2 サイクル以後は大体似通った形状のサイクルとなるが、応力の値および応力振幅は次第に少しずつ変化する。たとえば比較的降伏点の低い SUS 27 では最初のうち圧縮最大応力が引張最大応力よりも大きかったものが繰返し数が増加するにつれてヒステリシス曲線の位置が移動して逆に引張最大応力のほうが圧縮のそれよりも大きくなる傾向がみられた。しかし降伏点が高く、塑性ひずみ振幅の小さな Cr Mo V 鋼では必ずしもこの傾向はみられなかった。第 8 図は N と $\Delta \sigma$ との関係であって、大部分の場合にはサイクル数の増加につれて $\Delta \sigma$ が増加した。この場合には (1) 式の $\Delta \varepsilon_e$, $\frac{\Delta L}{L}$ は応力の増加につれて増加し、しかも $\Delta \varepsilon_t$ は一定であるから $\Delta \varepsilon_p$ は $\Delta \varepsilon_e$ と $\frac{\Delta L}{L}$ の増加の分だけ減少することになる。 N による $\Delta \sigma$ の変化は材料と温度サイクルによって異なるが、同じ温度サイクルでは弾性限度が高



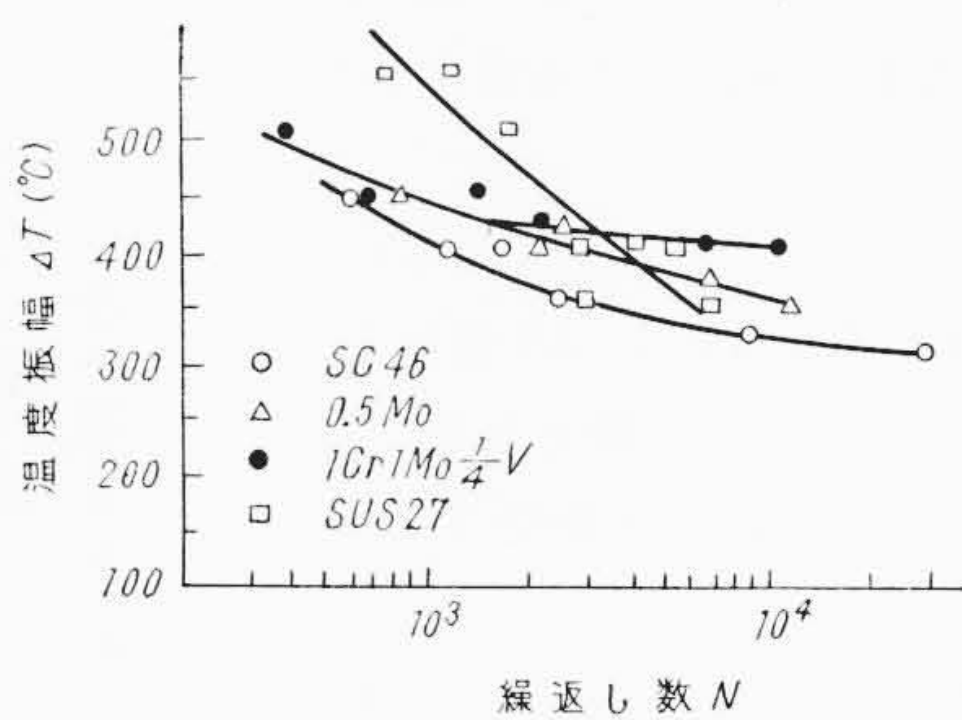
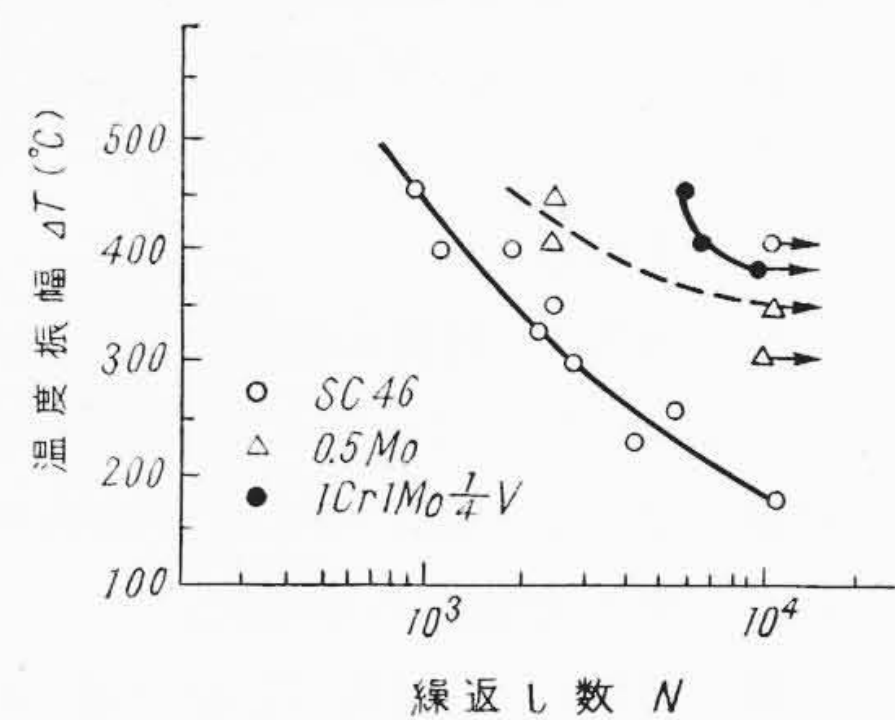
第9図 応力と変形



第11図 熱疲労によるき裂



第10図 き裂発生状況

(a) $T_1 = 100^\circ\text{C}$ (一定)(b) $T_1 = 500^\circ\text{C}$ (一定)

第12図 温度振幅と破断繰返し数

く塑性ひずみ振幅の少ない Cr Mo V 鋼 (A 材) ではきわめて少なく、SC 46 のように塑性ひずみ振幅の大きな材料では比較的大きかった。

第9図は SUS 27, SC 46, Cr Mo V 鋼について測定した応力と変形との関係の一例であって、同じ温度サイクルに対するヒステリシス曲線の差が明瞭である。

同図で曲線が横軸から切り取る長さは半サイクル間に生ずる試験片全長についての塑性変形量である。

3.2 試験片の破損状況

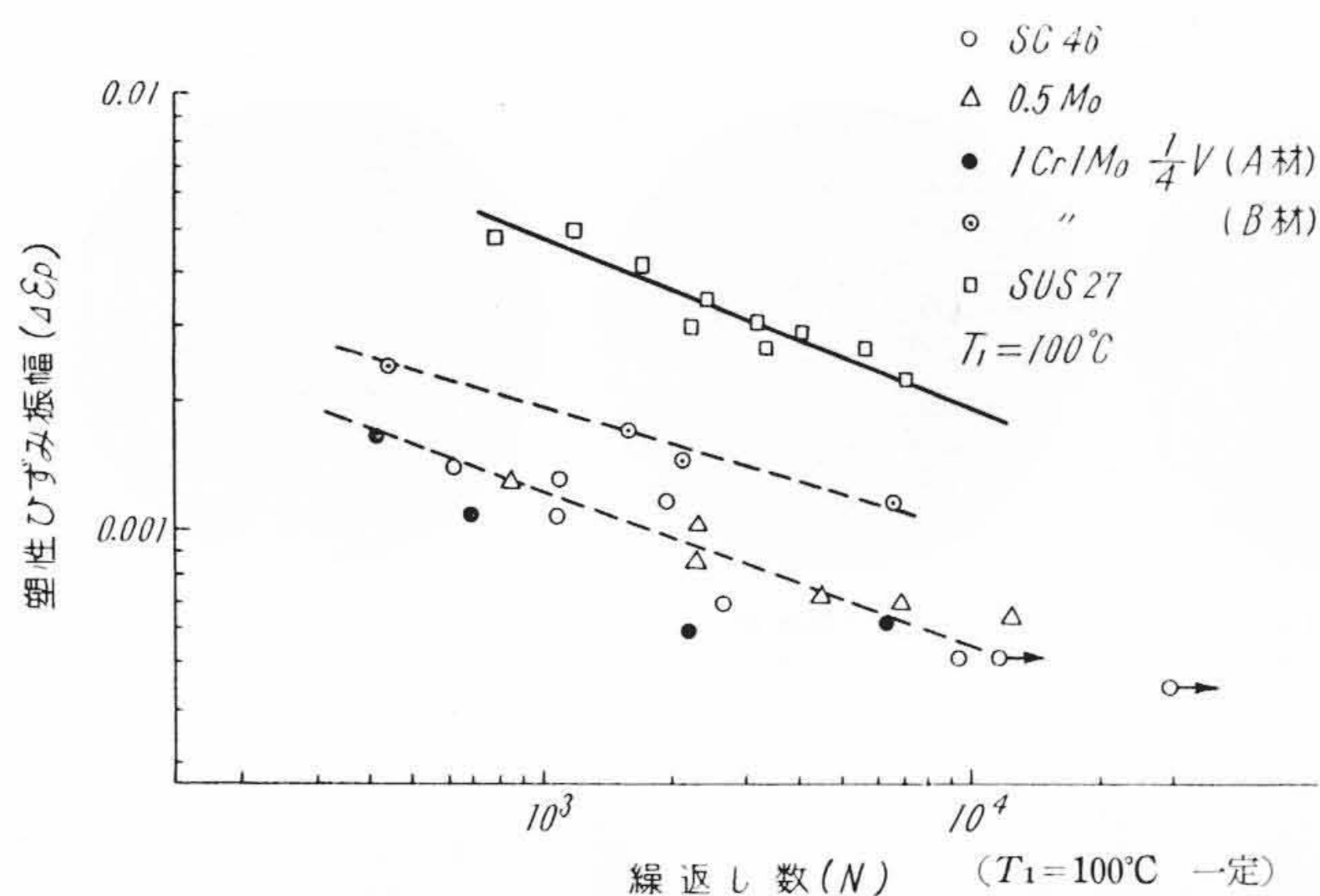
第10図は試験片の疲労き裂の発生状況である。平滑試験片の破断位置は多くの場合にほぼ試験片の中央であったが 0.5 Mo 鋳鋼および SUS 27 では時により中央から 10~30 mm ずれた位置で破断することがあった。有孔試験片では最小断面で穴縁からき裂が発生した。き裂の発生数は1個に限らず、試験片をたて割りにして断面を研磨し顕微鏡で観察すると微小なき裂が各所に発生していることが多かった。第11図はこのようにして見出された発生初期の段階にあるき裂の顕微鏡写真である。この写真からわかるようにき裂はほとんどすべての場合に貫粒形であったが、本実験では1サイクルの所要時間が 40 sec 程度の短時間であること、引張応力が低温で起るためにき裂が比較的低温で進行することなど、かなり条件が限られているので、時間、温度などの影響については今後検討すべき点が多い。同図(e)は高温 $T_2 = 500^\circ\text{C}$ における保持時間を12分とした

SUS 27のき裂であって、保持時間を0としたほかのものと異なり粒界形のき裂が発生している。しかしこの試験片の破断繰返し数は保持時間を0としたものと特に差は認められなかった。

3.3 温度振幅と強度

温度振幅 ΔT とき裂発生までの繰返し数 N との関係は試験片の温度分布や拘束条件などの試験条件によって異なるものであって、必ずしも一般性をもったものではない。しかしほぼ同一条件で行った各種材料の強度の比較という意味で実験結果の一部を紹介する。

第12図は下限温度 T_1 が一定の場合と上限温度 T_2 が一定の場合とについて ΔT と N との関係を求めた結果である。同図(a)で ΔT が大きい場合には SUS 27 は鋳鋼より大きな N に耐えているが、 ΔT が減少しても SUS 27 の N の値は鋳鋼ほど急には増えていない。同図で Cr Mo V 鋼の A 材と B 材とでは ΔT と N との関係にはほとんど差がみられなかったが、サイクル中に生じている現象にはかなりの差があり、A 材の応力振幅が 68 ないし 74 kg/mm² であるのに対して B 材のそれは 62 ないし 65 kg/mm² 程度であって、(1)式からわかるように、両者の $\Delta \epsilon_t$ が等しいと考えれば、両者の応力の差による $\Delta \epsilon_e$ および $\Delta L/L$ の分だけ B 材の $\Delta \epsilon_p$ が余計に生じていることになる。同図(b)では材料による強度差が非常にはっきり表われていて Cr Mo V 鋼が他材に比して非常に有利なことを示している。これは温度領域が高いための降伏点の低下による $\Delta \epsilon_p$ の増加および熱疲労に対する強度自体の低下が材料によって著しく異



第 13 図 塑性ひずみ振幅と繰返し数

なることの二つの原因によるものと思われるが、前者は試験片の拘束条件によって異なるからそれに従って同図の結果も異なってくるものと思わなければならない。

3.4 塑性ひずみ振幅と強度

(a) 塑性ひずみ振幅と破断繰返し数

繰返し塑性ひずみを受ける金属材料の寿命が半サイクルごとの塑性ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_p$ と密接な関係をもっていることはよく知られており、 $\Delta\epsilon_p$ と N の関係は次のような形で表わされる場合が多い⁽¹⁾⁽²⁾。

$$N^a \Delta\epsilon_p = k \quad (5)$$

a, k は常数で、材料の種類や温度その他の条件によって異なる。(5) 式の N と $\Delta\epsilon_p$ との関係は両対数グラフ上で直線となる。本実験の結果も一応このような方法で整理して種々の条件下での a, k の値を実験的に求めた。

第 13 図は下限温度 T_1 を一定、 100°C 、とした場合の $\Delta\epsilon_p$ を (1) 式についてのべた方法で E の値を仮定して求めたものと N との関係であって、SUS 27 については (5) 式で示されるような関係が成立することが認められる。一般に鋳鋼では塑性ひずみ振幅の量が小さくて測定誤差が入りやすいため、結果がかなりばらついているが、図のように Cr Mo V 鋼 B 材を除いた鋳鋼をまとめて点線 A で表わすことにして、 a, k を求めると次のようになる。

$$\text{点線 A} \quad N^{0.35} \Delta\epsilon_p = 0.142 \quad (6a)$$

$$1 \text{ Cr } 1 \text{ Mo } \frac{1}{4} \text{ V (B 材)} \quad N^{0.27} \Delta\epsilon_p = 0.104 \quad (6b)$$

$$\text{SUS 27} \quad N^{0.40} \Delta\epsilon_p = 0.078 \quad (6c)$$

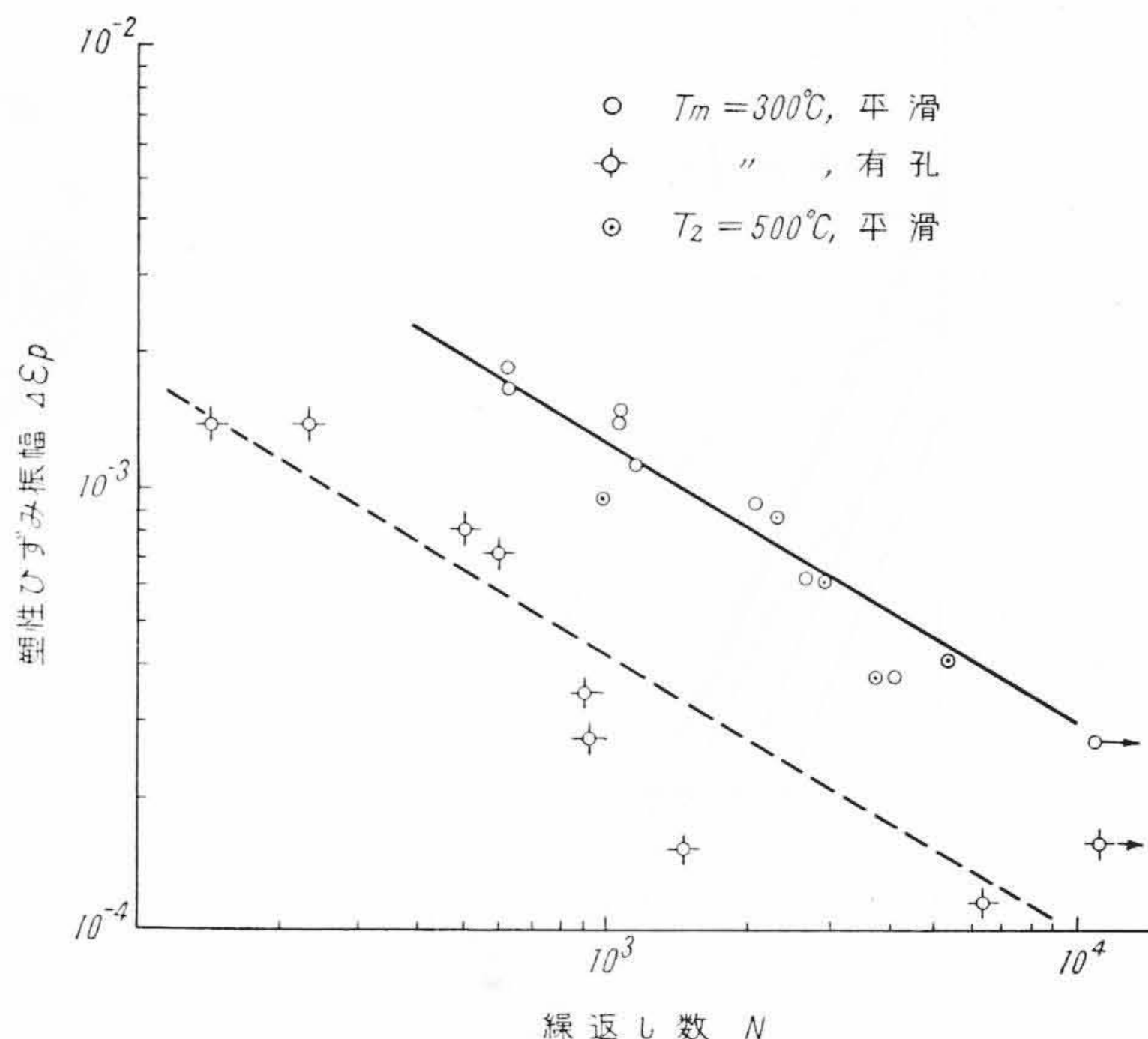
全体的に SUS 27 は鋳鋼よりも、同じ N に対して、数倍程度の大きな $\Delta\epsilon_p$ に耐えることがわかる。また、Cr Mo V 鋼の B 材は同 A 材に比べてかなり大きな $\Delta\epsilon_p$ に耐える。もちろん $\Delta\epsilon_p$ と N との関係だけでは熱疲労に対する材料の優劣が比較されるものではなく、与えられた温度と拘束その他の条件のもとでどれだけの $\Delta\epsilon_p$ が発生するかをあわせて比較しなければならないが、この点についてはあとで述べることにする。

上、下限温度の平均値 $T_m \left(= \frac{T_1 + T_2}{2} \right)$ を一定とした実験を行った結果が第 14 図である。同図の $\Delta\epsilon_p$ は (4) 式について説明したように温度上昇と下降時に応力 0 の点を通過する温度の差に対応する熱変形 δL_t から、弾性係数に無関係に求められるので第 13 図に比べて正確な値が得られる。それでもなお、ひずみが小さいために測定値に多少のばらつきがあるけれども、結果はほぼ (5) 式の形をとることがわかる。参考までに平滑材について a, k の値を求めてみると

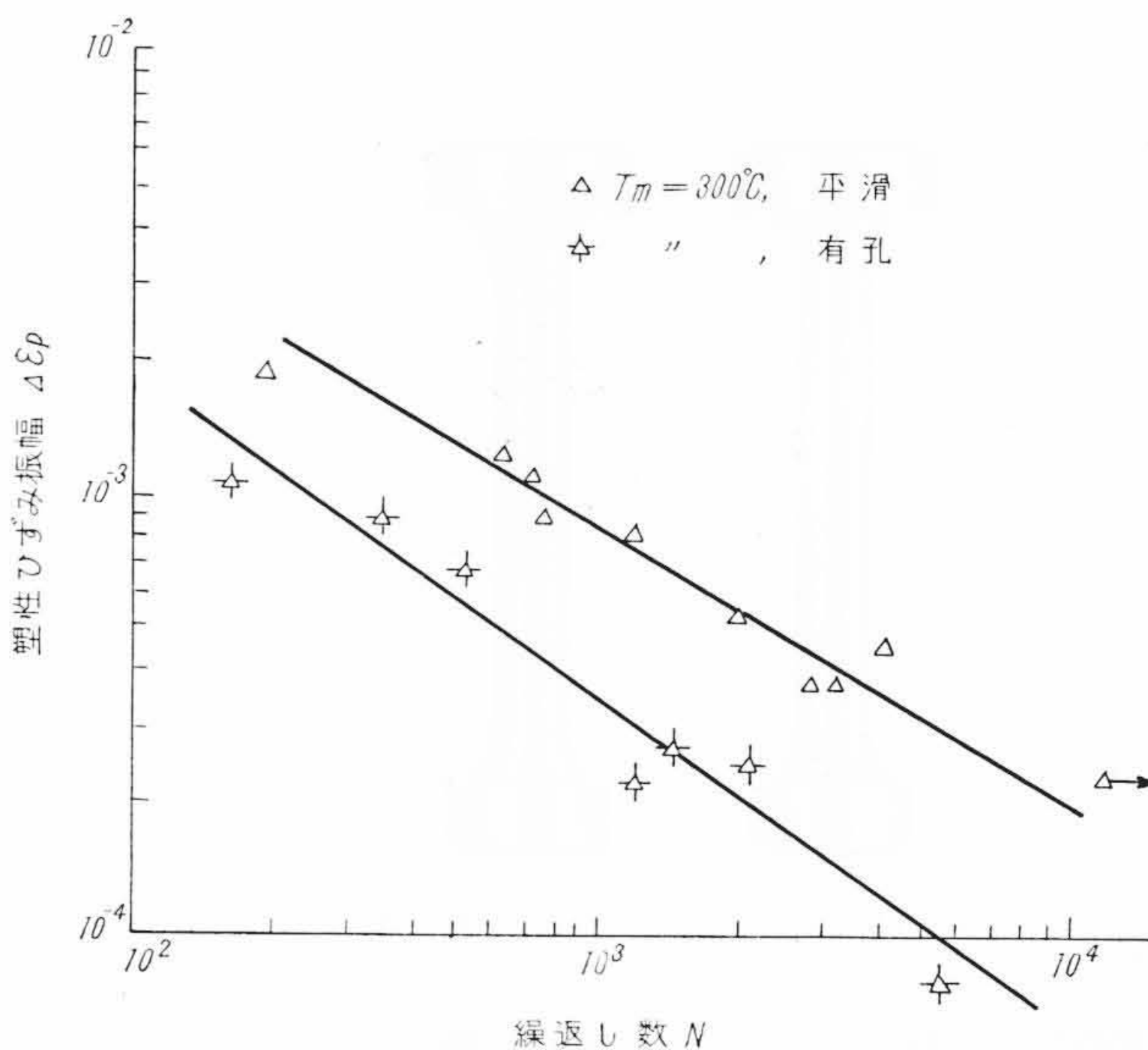
$$\text{SC 46} \quad N^{0.62} \Delta\epsilon_p = 0.096 \quad (7a)$$

$$0.5 \text{ Mo 鋳鋼} \quad N^{0.57} \Delta\epsilon_p = 0.043 \quad (7b)$$

となる。なお第 14 図 (a) には $T_2 = 500^\circ\text{C}$ とした場合の結果も記



(a) SC 46



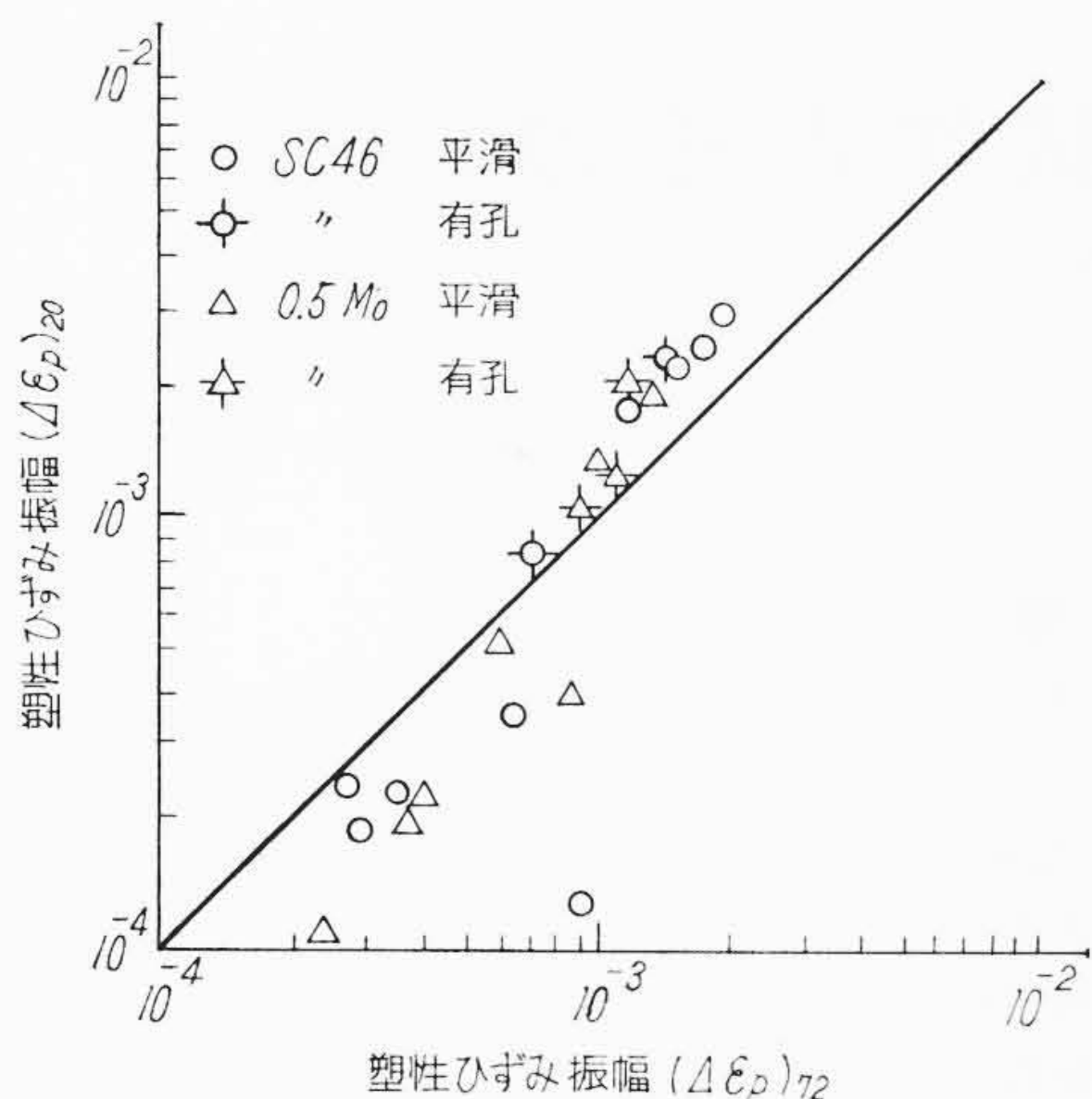
(b) 0.5 Mo 鋳鋼

第 14 図 $\Delta\epsilon_p$ と N と の 関 係

入してあり、この場合には T_m が 275°C から 375°C まで変化しているものであるが、 T_m を一定、 300°C とした結果との差は明りょうではない。第 13 図と比べると第 14 図のほうが直線の傾斜が急であるが、これは前者で $\Delta\epsilon_p$ を求める際に仮定した T_2 の値の影響がかなり大きいように思われるので、今後さらに検討したい。第 14 図からわかるように (5) 式の関係は有孔試験片についてもほぼ成り立つようであって、平滑試験片と有孔試験片との結果はほぼ同程度の傾斜をもった直線となる。

(b) ひずみの集中

(a)(b) で述べた $\Delta\epsilon_p$ はいずれも試験片の全長についての平均値であるが、実際には試験片の温度分布が長さ方向に一律でないために、生ずる塑性ひずみの分布も一律ではなく、一般に中央付近の高温部に集中する傾向があるように思われる。SC 46 および 0.5 Mo 鋳鋼について中央部 20 mm 間の塑性ひずみを顕微鏡で測定した結果は第 15 図のとおりであって、中央部 20 mm の塑性ひずみ振幅 $(\Delta\epsilon_p)_{20}$ は試験片の全長についての平均塑性ひずみ振幅 $(\Delta\epsilon_p)_{72}$ と比べて、 $\Delta\epsilon_p$ の値が 10^{-3} をこすような部分において特に、大きいことがわかる。 10^{-3} 以下の値にはかなりばらつきがあ



第15図 塑性ひずみ振幅の集中

るがこれは塑性ひずみの量が小さく、測定精度が不十分なためと思われる。SUS 27などに比べて塑性ひずみ振幅の小さな鋳鋼ではひずみ測定の精度の向上が今後解決を要する課題である。

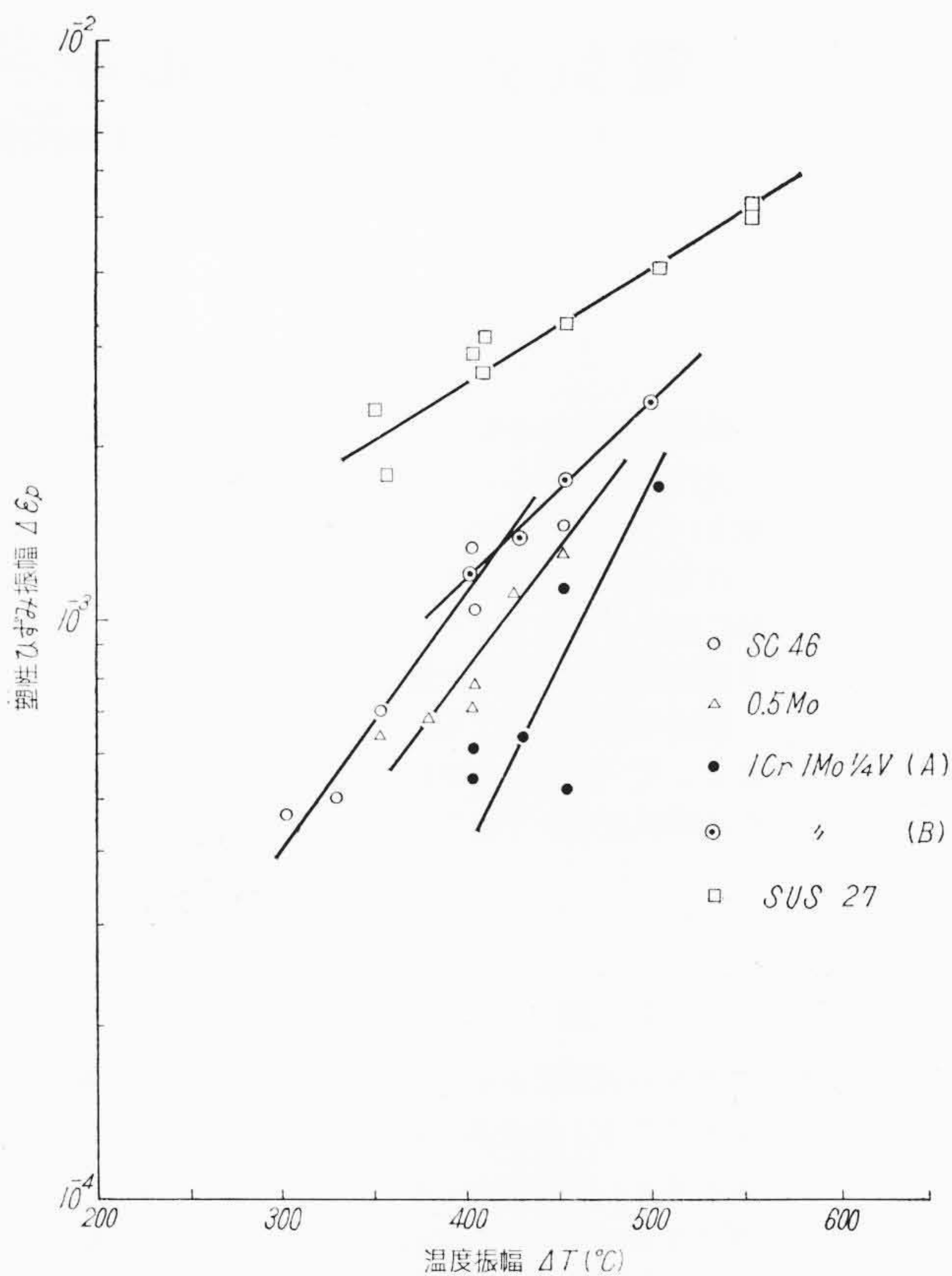
(c) 温度振幅と塑性ひずみ振幅

熱疲労における塑性ひずみ振幅の重要性はこれまで述べたとおりであるが、高級な材料が必ずしも大きな塑性ひずみに耐えるとは限らないのであって、同じ温度および拘束条件でどのような塑性ひずみが生ずるかということもあわせ考えてはじめて熱疲労に対する材料の優劣が比較される。第16図は第12図の試験の際の温度振幅 ΔT と塑性ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon_p$ との関係であって、線膨脹係数が大きく降伏点の低いSUS 27は鋳鋼材に比べて非常に大きな塑性ひずみを生ずることがわかる。また鋳鋼の中でもとくに降伏点の高いCr Mo V鋼(A材)は塑性ひずみが最も小さい。第12図において温度振幅の大きな部分でSUS 27が鋳鋼よりも強いのは第13図にみられるようにSUS 27が比較的大きな塑性ひずみ振幅に耐えうるからであり、温度振幅の小さな部分では鋳鋼と同程度の強さなのは、この付近以下の温度振幅では鋳鋼の塑性ひずみ振幅SUS 27のそれに比べてきわめて小さくなるためと解釈される。

4. 結 言

以上は蒸気タービンケーシングに用いられる1Cr 1Mo $\frac{1}{4}$ V 鋳鋼などの二、三の鋼材について行った熱疲労強度に関する実験の結果である。これを要約すると次のことがいえる。

- (1) 塑性ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon_p$ と破断繰返し数 N との間には $N^a \Delta \varepsilon_p = k$ の関係のあることが認められた。 a, k は材料および試験条件によってきまる常数である。



第16図 温度振幅と塑性ひずみ振幅

- (2) 本実験に用いた鋳鋼に関しては同じ破断繰返し数に対して耐えうる塑性ひずみ振幅がSUS 27に比べてかなり小さく、たとえば $\frac{1}{3}$ という程度にすぎないことがわかった。しかし同じ条件で鋳鋼に生ずる塑性ひずみ振幅がSUS 27よりもはるかに小さいため、条件によっては必ずしも鋳鋼のほうが不利とはいえない。

- (3) 鋳鋼の中では1Cr 1Mo $\frac{1}{4}$ V 鋼(A材)は特に降伏点が高く塑性ひずみが小さい点で熱疲労強度上有利である。なお同材で熱処理によって降伏点が低くなったB材も塑性変形能力が増すため、試験温度の範囲内では必ずしもA材より強度が低下しているとはいえない。

最後に本研究を行うに当り種々のご援助をいただいた日立製作所日立研究所大内田主任研究員、日立工場久保田主任、そのほかの各位に対し厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) L. F. Coffin: Trans. ASME, Aug. 1954
(2) S. S. Manson: Machine Design, Aug. 1958

Vol. 23

日

- ◎巻頭随筆.....小森和子
◎名古屋市地下鉄の自動運転
◎函 札 マ イ ク ロ
◎機 械 の 中 の 炭 素
◎ハイライト「計測工業展」
◎誰でも操作できる押ボタン式交換機

立

No. 2

- ◎明日への道標「小平記念研究室」
◎エヤーリフトポンプと温泉
◎電線百話(2) エレキテルと切支丹の話
◎フライアッシュのでないサイクロンファーンボイラ
◎読者の声「家庭電気品と周波数の問題」

発行所 日立評論社

取次店 株式会社オーム社書店

東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地
振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座 東京 20018 番