

—55°C および室温での S15C 切欠き材の ひずみ制御低サイクル疲労挙動

宮 野 泰 治・安 藤 正 昭・大 山 博 史*

Strain Control Low Cycle Fatigue Behavior of Carbon Steel (S15C) with Notch at -55°C and Room Temperature

Taiji MIYANO, Masaaki ANDO and Hiroshi OHYAMA

(1994年 8 月22日受理)

Following the previous paper of load control fatigue test, one side sign curve strain control low cycle fatigue test were conducted on carbon steel (S15C) at -55°C and room temperature. Shape and size of specimen were same as previous experiment. Plate specimen of 6 mm thickness had U shape notch at the center.

The results obtained are summarised as follows:

- (1) Fatigue life is independent of mean strain which is under 50×10^{-3} . Strain amplitude is main factor of effects on fatigue life.
- (2) Effect of rising fatigue life have tendency to increase as strain amplitude increase at low temperature (-55°C).
- (3) Stress amplitude at one cycle are almost constant in fatigue process except in very beginning of fatigue and in later. Value of strain amplitude is dependent on strain amplitude, independent of mean strain and temperature.
- (4) In fatigue process, maximum stress decrease rapidly in very beginning (under 5% of N/N_f at room temperature, under 10% of N/N_f at -55°C) and in later over 80~90% of N/N_f . Maximum stress changes gradually in intermediate process of fatigue.
- (5) Maximum stress of intermediate in fatigue process at -55°C is greater than that at room temperature. Maximum stress is approximately constant without effects of mean strain and upper limit strain at -55°C, but with little effect of upper limit strain at room temperature.

1. 結 言

寒冷環境下で使用される機械構造用炭素鋼の強度特性の検討の一貫として、これまでに報告¹⁻⁶⁾してきた一連の実験に引き続き、本報告は、S15C 材を供試材として、片振りのひずみ制御疲労試験を室温と低温-55°Cで行ったものである。

試験片は、前報告の荷重制御疲労の場合の U 形ノッチ試験片と全く同じもの⁶⁾を使用した。実験では、主として、試験片に発生する繰返し応力の挙動を調べて疲労挙動を検討し、疲労挙動におよぼすひずみ

振幅や平均ひずみ、最大ひずみの影響と低温の影響を考察した。また、前報告の荷重制御の結果との関連性についても検討を試みた。

以下に、その大要について報告する。

2. 試験片および実験方法

2・1 試験片

実験に用いた試験片は、前報⁶⁾の試験片 U と同じもので、市販の機械構造用鋼 S15C 材 $\phi 22$ 丸棒から図 1 に示すような形状寸法を有する板状に機械加工し、その中央部にワイヤカットによる U 形ノッチを付したものである。これを 920°C 1 時間の真空焼き

*秋田高専専攻科学生

—55°C および室温での S 15 C 切欠き材のひずみ制御低サイクル疲労挙動

表 1 化学成分 (%)

C	S i	M n	P	S	C u
0.16	0.24	0.40	0.017	0.030	0.04

表 2 静的引張試験結果

試験片温度 °C	ストローク 変位速度 mm/min.	上降伏点 MPa	下降伏点 MPa	引張強さ MPa	伸び %
室 温	1	262	260	421	22.9
	5	283	267	431	24.4
	10	298	285	435	23
-55	1	367	335	485	16.4
	5	386	350	489	19.2
	10	422	375	496	15.5
-105	1	507	441	507	8.3
	5	529	444	538	7.8
	10	530	454	532	6.2

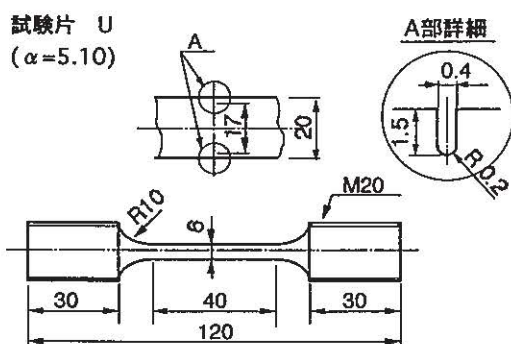


図 1 試験片の形状寸法

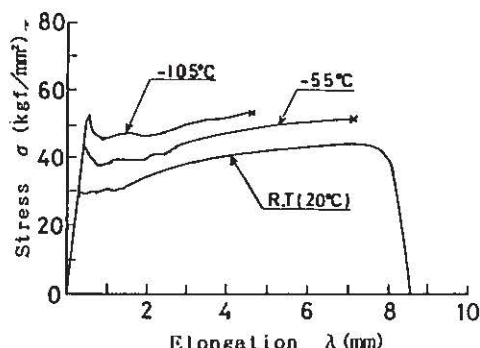


図 2 荷重変形図 (変位速度 10 mm/min)

なまし処理をしてから実験に用いた。供試材の化学成分を表 1 に、また、この試験片の、室温、-55°C、-105°C の各温度における変位速度 1, 5, 10 mm/min での静的引張試験結果を表 2 および図 2 に示す。表 2 の結果より得られた考察は前報のとおりである⁶⁾。

2・2 ひずみ制御疲労試験

使用した試験機は、電気油圧サーボ式材料試験機 (島津 EHF-UD10) で、低温での試験は、試験片およびそのチャック部装置を覆う恒温槽中に液体窒素を噴霧させ、C-C 熱電対からの温度検出により、試

験片表面温度を $-55 \pm 2^\circ\text{C}$ に保持して行った。

ひずみ制御疲労試験は、試験機のストローク制御で行った。繰返し速度は、ひずみ振幅の大小により 1 Hz と 3 Hz にした。

ここで、試験機のストローク信号は、チャック間距離の変位に対応するものであるが、チャック部と試験片の形状寸法の剛性を考慮すれば、チャック間距離変位の大部分は、試験片中央部の伸びに相当しているものと考えられる。そこで、本実験では、ストローク変位を、図 1 に示す試験片の板状部分 40 mm の伸びを代表したものとみなし、40 mm の長さに対する公称ひずみで評価し実験結果を整理することにした。

ひずみ制御疲労試験は、平均ひずみ ϵ_m を、5%, 3.75%, 2.5%, および、ひずみ比 $\epsilon_L/\epsilon_U = 0$ ($\epsilon_m = 0.16 \sim 0.4\%$) の 4 種類に設定して行った。これらの場合の平均ひずみの各々は、ストローク変位の 2 mm, 1.5 mm, 1 mm, および、0.064 mm ~ 0.16 mm に相当している。

ひずみ制御での疲労寿命については、試験片に発生するき裂が一定量に達する繰返し数を寿命 N_f と定義する場合が一般的であるが⁷⁾、本報告では、便法として、試験片に発生する最大応力 σ_U の値が、繰返し数 $N = 300$ 回のときの値の 1/2 に達したときの繰返し数を、破断寿命 N_f とすることにした。これは、3 章で述べる疲労過程中的試験片に発生した抵抗応力の挙動を参考にしたもので、疲労開始時にみられる σ_U の上昇と下降の速度が $N = 300$ 回ではかなり緩やかとなって定常状態に近付いていること、そしてまた、疲労後期のき裂拡大に伴う σ_U の下降速度は、 $N = 300$ 回のときの σ_U の値の 1/2 程度に達するころ、急激となる様相を呈していることから、このような N_f の定義を試みたものである。なお、この N_f のときのき裂長さは試験片断面のおよそ 1/2 程度を占めていた。

3. 実験結果および考察

3・1 疲労寿命曲線

繰返しひずみ振幅 ϵ_a と寿命 N_f を両対数目盛にとった寿命曲線を図 3 に示した。

図中の平均ひずみ ϵ_m は設定値であるが、実際の実験では、制御誤差のため、設定値のそれぞれに対し、4.99 ~ 5.03%, 3.69 ~ 3.76%, 2.43 ~ 2.61% の範囲の中で行われている。ばらつきがやや大きい、図から、寿命に対しては平均ひずみの大小の影響は

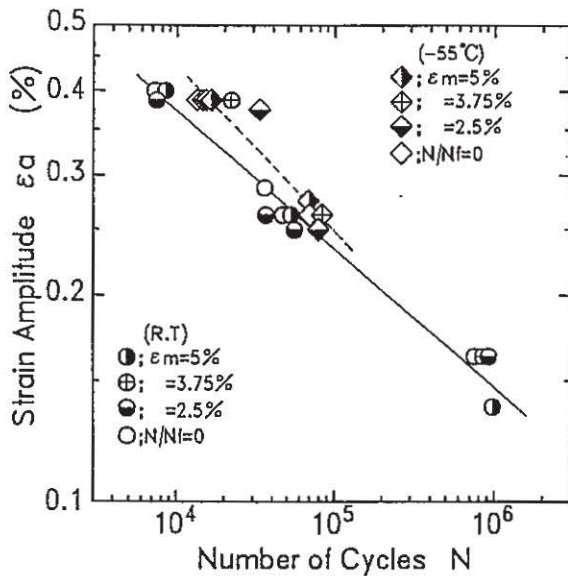


図3 疲労寿命曲線 (ϵ_a - N 曲線)

明瞭でなく、寿命の主たる影響因子はひずみ振幅であることがわかる。温度条件では、低温による寿命上昇効果が認められる。最小二乗法近似した図中の各温度における寿命曲線で、室温に対する低温 (-55°C) の寿命上昇比を推定すれば、 $\epsilon_a = 0.3875\%$ では約2.04倍、 $\epsilon_a = 0.25\%$ では約1.3倍となっており、 ϵ_a の大きい低寿命側のほうで寿命上昇比が大きくなっていた。

3・2 繰返し応力の挙動

疲労過程に試験片に発生する繰返し応力 (最大応力と最小応力) を計測した。その一例を図4に示す。応力は試験片切欠き部の公称応力で表したものである。

繰返し応力は、疲労初期に急激に変化し、その後、定常的な状態を続け、疲労後期に再び大きく変化している。しかし、その応力振幅 σ_a は疲労の極く初期を除けば、殆ど一定値を呈しているようにみえる。

図5は、図4の場合の疲労初期の繰返し最大応力 σ_u と応力振幅 σ_a を拡大して示したもので、この図には、同一ひずみ条件の低温 (-55°C) の場合も併せて示してある。繰返し数 N が50回付近までは、 σ_u 、 σ_a とも上昇し、繰返しひずみ硬化挙動を示している。その後、 σ_u のほうは下降し、やがて、小さな上昇、下降を繰返して下降していくが、 $N = 300$ 回付近では、かなり変化が緩やかになっている。一方、 σ_a のほうは $N = 50$ 回過ぎから上昇、下降のつりあった一定値を呈するようになる。温度条件の差異では、 σ_u は低温 (-55°C) のほうが明らかに大きい、 σ_a

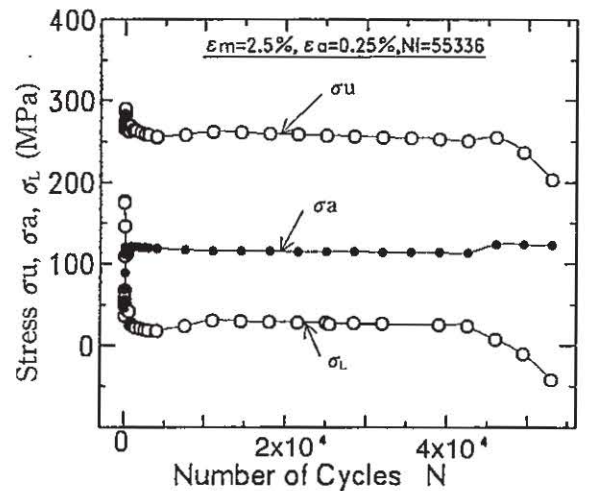


図4 疲労過程の繰返し応力挙動

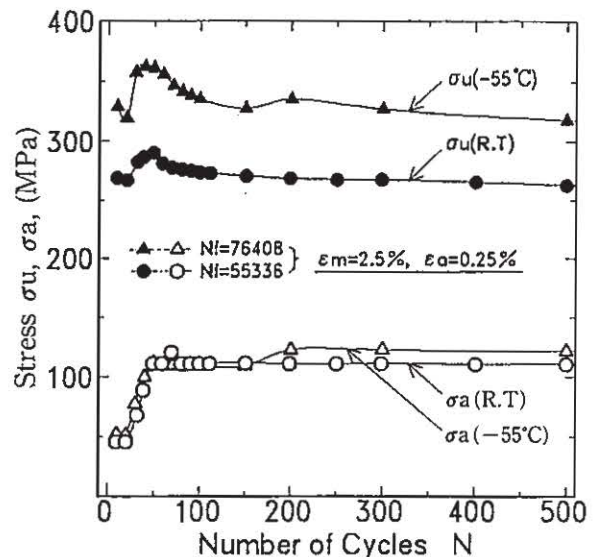


図5 疲労初期 ($N = 500$ 回まで) の繰返し最大応力と応力振幅の挙動

には大差が認められない。以上のような繰返し応力の挙動は、他の試験条件の場合においても、大略において共通していた。

図6(a)~(b)に、平均ひずみ ϵ_m が、5%、3.75%、2.5%のときの、 σ_u と σ_a の挙動を示した。横軸の疲労過程は寿命比 N/N_f で表してある。これらの各図から一般的な傾向をみると、試験片に発生する繰返し応力は図4でみたような三つの段階を経過して変化していることがわかる。

まず、 σ_u についてみると、疲労の極く初期で一時上昇してから、急激な下降をみせる。続いて、室温

では寿命比0.05過ぎ、−55℃では0.1過ぎ頃から、以後の疲労の大部分の期間を、若干の上昇と下降を繰返しながら、(極めて緩やかに下降し続けたり、少し上昇したりする場合もあるが、)大略では一定値を呈しているかのようにみえる状態が続く。そして、疲

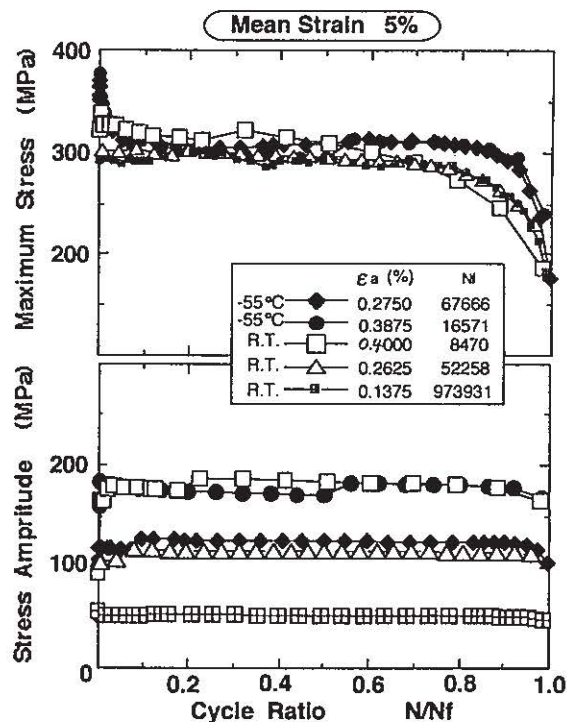


図 6(a) 最大応力と応力振幅の挙動 ($\epsilon_m = 5\%$)

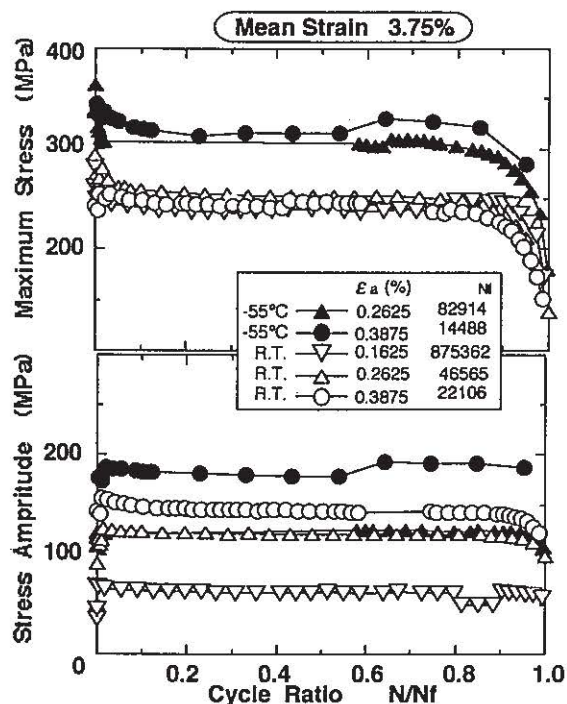


図 6(b) 最大応力と応力振幅の挙動 ($\sigma_m = 3.75\%$)

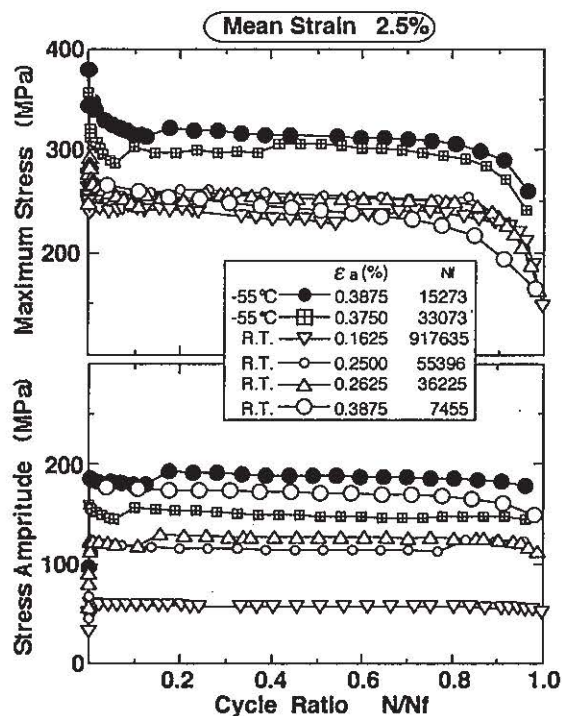


図 6(c) 最大応力と応力振幅の挙動 ($\sigma_m = 2.5\%$)

労後期の寿命比0.8~0.9過ぎから、また明瞭な下降現象が再開され、寿命が近付くにつれ急激となる。

σ_u が定常状態にある第2段階の期間では、 σ_u の値に、規則性やひずみ振幅の大小の明瞭なる影響は認められず、それぞれの平均ひずみのもとで、 σ_u は近い値となっている。また、平均ひずみ ϵ_m が2.5%と3.75%では、温度の影響が現れ、低温(−55℃)のほうが大きい値となるが、 $\epsilon_m = 5\%$ では低温(−55℃)と室温との値には大差がみられない。

つぎに σ_a について述べる。全ての試験片で、 $N = 50$ 回程度で、ひずみ硬化を示す応力の上昇がほぼ終わり、その後は、若干の上昇(硬化)や下降(軟化)を繰返すが、寿命間際まではほぼ一定値を示す定常状態が続いている。この期間の σ_a の値はひずみ振幅に依存し、平均ひずみや温度の影響は極めて少ないことが観察される。

図には繰返し最小応力 σ_L の挙動を表していないが、以上の結果で見られた σ_u の下降現象は、同時に、 σ_L の下降(すなわち圧縮力の上昇)を示しているものである。 σ_L は、疲労開始直後の σ_u が一時上昇するときでも、下降し続けていた。そして、この時期は σ_a の上昇期間に相当していた。

疲労初期の繰返し応力挙動は、繰返しと共に、上限のひずみ(ϵ_u)に対する引張力は低下し、下限のひずみ(ϵ_L)に戻るための圧縮力が上昇している現象であって、塑性伸び変形が増大して行く過程を示唆し

ているものと考えられる。これに対して、疲労後期の挙動は、主に、き裂の発生と拡大に伴う現象で、 ϵ_U に対する引張力はき裂の拡大とともに当然小さくなり、 ϵ_L に対する圧縮力の上昇は、き裂付近の塑性変形の増加に伴う現象であると考えられる。

図7は、比較的緩やかに変化している第二段階の期間での σ_U の様相を示したものである。1個の試験片で観測された、寿命比 N/N_f が、それぞれ、0.01, 0.5, 0.9のときの σ_U を縦軸に、その試験片に与えられた最大ひずみ $\epsilon_U (= \epsilon_m + \epsilon_a)$ を横軸にとっている。図中の、3個の記号を縦に重ねた直線は1個の試験片の結果を意味し、破線は各試験片の $N/N_f = 0.5$ で示された傾向の大略を示す。また、同一グループの ϵ_m での横方向の変化は ϵ_a の大小によるものである。

図より、 σ_U は N/N_f の増加に伴い下降する傾向に

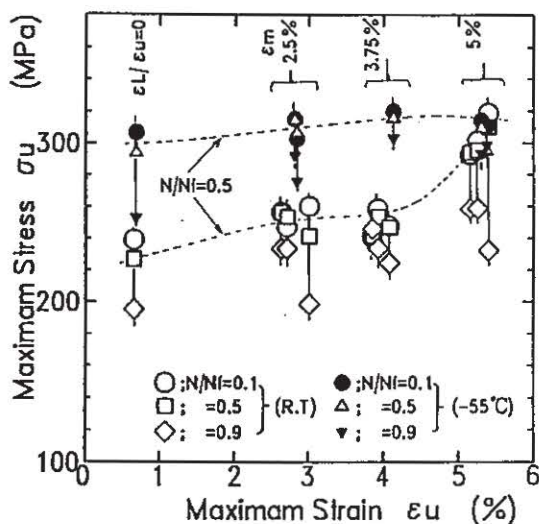


図7 最大ひずみと最大応力の関係

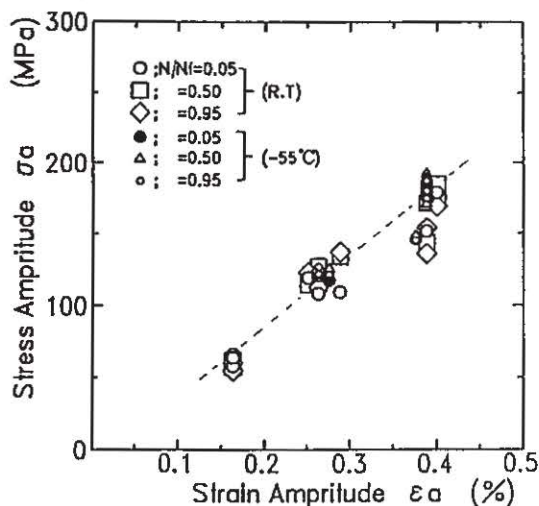


図8 ひずみ振幅と応力振幅の関係

はあるが、0.1と0.5には大差がなく、0.9ではかなりの下降が認められる。しかし、 ϵ_U や ϵ_m , ϵ_a による規則性は明瞭ではない。つぎに、 σ_U と ϵ_U の関係をみると、やや相関がみられ、 ϵ_U が増大すると σ_U もわずかに増大する傾向がみられる。また、同一レベルの ϵ_U に対しては、 $\epsilon_U = 4\%$ 程度以下では低温 (-55°C) での σ_U は室温よりかなり大きな値をとるが、 ϵ_U が 5% 程度になると大差がなくなっている。

図8は、 N/N_f が0.05と0.5および0.95のときの ϵ_a と σ_a の関係を示したものである。この図では、 σ_m が異なっているにもかかわらず1個の記号に統一している。例えば、室温で $N/N_f = 0.05$ の○印のそれぞれには、 ϵ_m が 5% , 3.75% , 2.5% や $\epsilon_L/\epsilon_U = 0$ の試験条件の場合がある。図から、 ϵ_a が大きいほうでは、ばらつきが大きくなるが、 ϵ_a と σ_a の関係は、おおむねでは、一つの直線上に収束しているとみなし得る。したがって、試験片に発生する σ_a には ϵ_m や温度の影響は殆どみられず、 ϵ_a にのみ依存していることがわかる。

4. 荷重制御疲労試験結果との関連について

前報⁶⁾では、本報告と同じ試験片を用いた片振りの荷重制御の塑性疲労試験を行った。その結果と本実験結果との関連について以下に検討を試みる。

(1) 低温 (-55°C) による寿命上昇効果は、ひずみ制御ではひずみ振幅の大きいほうが、荷重制御では応力振幅の大きいほうが、増大している。すなわち、低寿命側で上昇効果が大きくなる。

(2) 荷重制御では塑性伸びの挙動が大略3段階を経過して破断に至るのに対し、ひずみ制御でも試験片に発生する抵抗応力の挙動が3段階を経過して破断に至る。ひずみ制御での応力挙動も塑性変形に伴う現象であって、塑性疲労の現象の本質では、両者の試験に同じ結果が現れている。

(3) 荷重制御では、1サイクルの繰返し伸び幅は、疲労過程の大部分において、一定値を呈し、それらの値については、主に繰返し応力幅にのみ依存し、最大応力 σ_U や温度の影響は極めて少なかった。これに対し、ひずみ制御では、疲労過程の大部分、1サイクルの応力振幅 σ_a が一定値を呈し、 σ_a の値は、ひずみ振幅 ϵ_a に依存し、平均ひずみ ϵ_m や温度の影響は見られない。

いま、前報での繰返し伸び幅を、本報告の場合と同様に、試験片の板状部分40 mmの公称ひずみで評価し、ひずみ振幅 ϵ_a と応力振幅 σ_a の関係で整理し

直すと図9のようになる。この図に、本実験の図8の $N/N_f = 0.5$ の結果を併せて示した。

図9より、荷重制御でもひずみ制御でも、 ε_a と σ_a は極めて強い相関があり、試験法の違いにも関係なく、一つの直線関係で表されるような傾向にあることがわかる。ただし、ひずみ制御のほうが少しばらつきは大きいようである。

この結果より、前述の図3の寿命曲線(ε - N 曲線)の ε_a を $N/N_f = 0.5$ のときの応力振幅で評価し直して、S-N 曲線に変換し、また、前報告の荷重制御での S-N 曲線も両対数グラフに変えて、両者を合わせて示すと図10のようになった。図から、本実験のひずみ制御の結果は、前報告の平均応力 $\sigma_m = 161.7$ MPa の結果に近い結果となっていることが観察さ

れる。また、この図と図3を対比すると、図3でみられた、ひずみ振幅同一レベルでの寿命のばらつきは、実際に試験片に発生した応力振幅の差によるものであることが推察される。

(4) 荷重制御では、疲労中の塑性伸びの挙動は、応力振幅 σ_a には依存せず、繰返し最大応力 σ_U に支配され、塑性伸びと σ_U の関係は大略では直線の関係がみられた。これは、換言すれば、繰返し最大応力 σ_U と最大ひずみ ε_U との関係に相当する。これに対して、ひずみ制御では、 σ_U と ε_U には荷重制御のような強い相関は認められなかった。これらは、変位無拘束の荷重制御と、変位が拘束されているひずみ制御の違いによるもので、ひずみ制御では塑性疲労に伴う塑性伸びの現象が σ_U の下降として現れることによる相違であると考えられる。

以上の検討結果より、荷重制御とひずみ制御では、その塑性疲労挙動の本質的な現象においては差異は認められないようであった。

5. 結 言

前報の片振り荷重制御疲労試験に引き続いて、同じ U 形ノッチを有する試験片 (S15C) を用い、片振りのひずみ制御低サイクル疲労試験を、室温と低温 (−55℃) で行った。

得られた主な結果を要約すればつぎのとおりである。

- (1) 繰返し平均ひずみは、実験範囲の 5 % 以下では、疲労寿命に影響を及ぼさない。ひずみ振幅が疲労寿命の主たる影響因子となっている。
- (2) 低温 (−55℃) による寿命上昇効果は、ひずみ振幅が大きいほうの低寿命側で増大する傾向がみられる。
- (3) 1 サイクルの繰返し応力振幅は、疲労の極く初期と破断寿命間際を除けば、疲労過程中、殆ど変化しないで一定値を呈している。その値はひずみ振幅に依存し、平均ひずみや温度の影響は殆ど認められない。
- (4) 疲労過程中的最大応力は、疲労初期と後期に大きい下降を示す。その中間部の疲労過程では極めて緩やかに下降し続けるものや、ほぼ、一定値を呈しているような場合がある。
- (5) その疲労中期の最大応力は、最大ひずみとやや相関がみられる。同一レベルの最大ひずみにおいては、低温 (−55℃) のほうが室温より大きいが、最大ひずみが、大きいほうの、5 % 程度になると

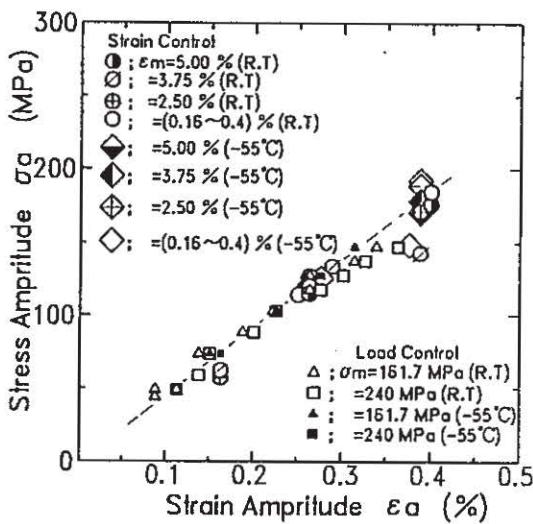


図9 ひずみ振幅と応力振幅の関係

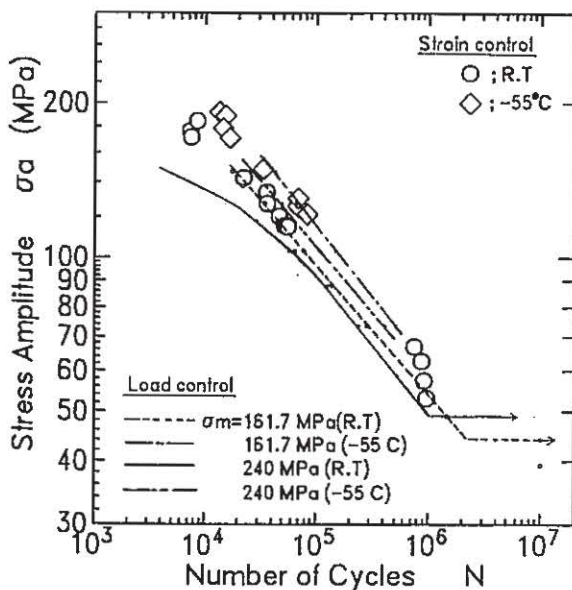


図10 S-N 曲線

大差がなくなる。

- (6) 前報告の荷重制御疲労試験の結果との関連を検討すると、塑性疲労の挙動の本質的な面では、制御条件の違い等の試験法の差異による影響は認められず、低温(−55°C)の影響にも大きな差異はない。

- 2) 斎藤, 宮野, 秋田高専紀要, 20, 1 (1985)
- 3) 宮野, 安藤, ほか 2 名, 秋田高専紀要, 25, 1 (1990)
- 4) 宮野, 安藤, 杉沢, 秋田高専紀要, 26, 1 (1991)
- 5) 宮野, 安藤, 秋田高専紀要, 28, 1 (1993)
- 6) 宮野, 安藤, ほか 2 名, 秋田高専紀要, 29, 1 (1994)
- 7) たとえば, 日本材料学会編, 金属材料設計便覧, 養賢堂, 198 (1978)

参考文献

- 1) 斎藤, 宮野, ほか 2 名, 秋田高専紀要, 19, 1 (1984)