

S15C材の-55℃および室温での疲労下における塑性疲労挙動

宮野 泰治・安藤 正昭**
芳賀 晃治*・本田 弥*

Plastic Deformation Behavior of Fatigue on Carbon Steel at -55℃ and Room Temperature

Taiji MIYANO, Masaaki ANDO

Kohji HAGA and Wataru HONDA

(1993年10月29日受理)

Fatigue test of one side sign curve tension were conducted on carbon steel(S15C) by load-controlling at -55℃ and room temperature. Plate specimen of 6mm thickness had U shape notch or circular arc notch at the center.

The results obtained are summarised as follows:

- (1) As stress amplitude(σ_a) increased, effect of rising fatigue life increased and plastic deformations became markedly small at -55℃. It is estimated that is attributed to rising of yield point for static tensile characteristics at low temperature.
- (2) Maximum repeated stress exert influence on fatigue life and average stress(σ_m) have no effect under a certain value of maximum stress(σ_{max}).
- (3) Cyclic elongation range($\Delta\ell$) corresponds to stress amplitude(σ_a) with constant value and are independent of maximum stress(σ_{max}).
- (4) Plastic deformation is governed by maximum stress(σ_{max}) and not by stress amplitude(σ_a) in fatigue process.
- (5) In case of large plastic deformation, it is presume that fracture occurs when true maximum stress calculated by final fracture area reach to a certain value.

1. 緒 言

著者らは、機械構造用炭素鋼の低温下における強度特性を検討するため、これまで、静的引張、単一衝撃引張、正弦波荷重の疲労、衝撃疲労等についての実験を行い報告してきた^{1)~5)}。

本報告では、引き続き、S15C材を供試材とし、塑性変形量が大きくなるように平均応力を与えた場合の正弦波片振り引張負荷の疲労試験を室温と低温-55℃で行って、両温度条件での疲労寿命や疲労過程中的変形挙動を調べ、それらに及ぼす応力振幅や平均応力、繰返し最大応力の影響を考察したものである。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

供試材は、表1に示す化学成分を有する、市販の機械構造用炭素鋼S15C材で、これを納入のままの

* 大館ニューロング工業(株)

** オリイ精機(株)

表1 化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.16	0.24	0.40	0.017	0.030	0.04

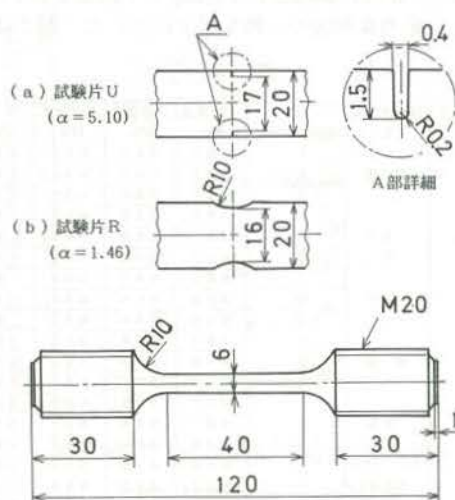


図1 試験片の形状寸法

φ22丸棒から、図1に示すような形状寸法を有する板状の試験片に機械加工した。中央部にはワイヤカットによるU形ノッチ(試験片U)と、フライス加工による円弧ノッチ(試験片R)を付してある。それぞれの応力集中係数 α は、Heywoodの式⁶⁾を用いると5.10および1.46であった。これら試験片に920℃で1時間の真空焼きなましを施し実験に用いた。疲労試験は、電気油圧サーボ式材料試験機(島津EHF-UD10)を使用し、繰返し速度10Hz、正弦波片振り引張負荷の荷重制御で行った。

本実験で行われた試験条件では、試験片の伸びは比較的大きく変化するので、ひずみゲージでは対処出来ない。そこで、試験機のスローク信号によって、試験片の伸びを推定し、疲労過程における伸びの挙動の検討を行うことにした。これは、試験中のスローク変化は、チャック間にある試験片の伸びに対応するものであり、また、試験片形状を考えれば、その伸びの大部分は切欠き部付近の変形を代表していると推察出来るためである。

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。

3. 実験結果および考察

3.1 試験片の静的引張特性

疲労試験と同じ試験片を用い、室温、 -55°C 、および -105°C の各温度で、変位速度を1, 5, 10mm/minとして、静的引張試験を行った。その結果を表2に、また、応力変形図の一例を図2に示した。図2は試

験片Uの変位速度10mm/minの場合であるが、他の試験条件の場合も同様な傾向を示していた。

表2の結果をまとめると以下ようになる。

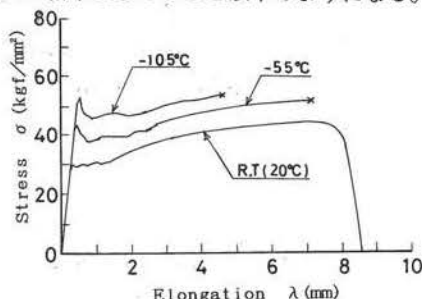


図2 応力変形図(試験片U, 変位速度10mm/min)

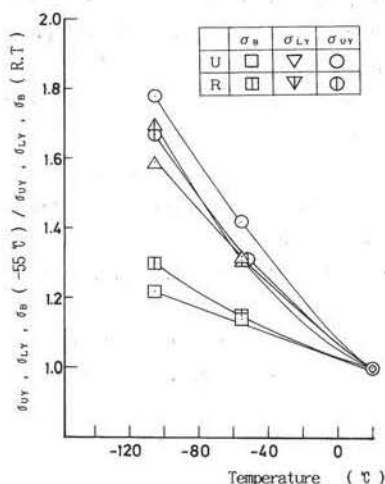


図3 低温による降伏点と引張強さの上昇比

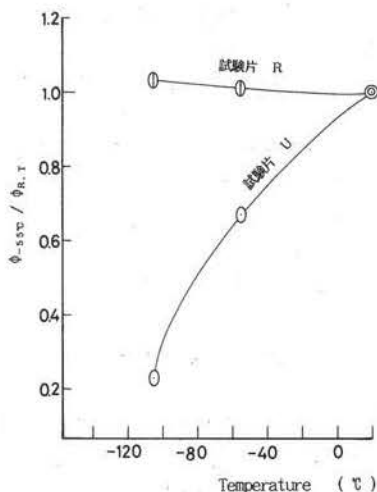


図4 低温による伸びの減少比

表 2

試験片	試験片温度 ℃	スローク 数値 mm/min	上降伏点 MPa	下降伏点 MPa	引張強さ MPa	伸 び %
U	-室 温	1	262	260	421	22.9
		5	283	267	431	24.4
		10	298	285	435	23.0
	-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
R	室 温	1	261	248	422	30.8
		5	279	273	426	27.2
		10	330	281	432	29.2
	-55	1	377	326	488	30.6
		5	401	344	487	31.6
		10	428	369	497	29.5
	-105	1	516	435	557	30.7
		5	552	462	565	29.8
		10	552	477	561	30.1

S15C材の-55℃および室温での疲労下における塑性疲労挙動

(1) 温度の低下とともに上降伏点、下降伏点、引張強さが上昇し、室温での各値に対し、-55℃ではそれぞれ約40%、30%、15%の上昇がみられた。(図3)
 (2) 切欠き部をはさむ30mm間の伸びの様相は、試験片Rでは、低温の影響はほとんど認められないが、試験片Uでは-55℃付近では室温の場合の20~30%減となった。(図4)
 (3) 各変位速度での引張試験結果より、変形速度が大きくなるとともに、降伏点、引張強さが上昇する傾向にある。本報告の疲労試験では、試験片は0.05秒で約0.08~0.3mm程度の伸びを繰返しているの、変形速度は96~360mm/minくらいの範囲となる。したがって、疲労試験時の降伏応力は、表2の値より大きくなっていることが予想される。

3・2 S-N曲線

平均応力 σ_m を161.7MPaおよび240MPaとした、部分片振り応力の疲労試験結果のS-N曲線を図5に示す。応力はすべて切欠き底断面の公称応力で表したものである。円弧ノッチの試験片Rの場合、(本実験での試験片形状寸法では)、応力振幅 σ_a が小さいときや低温では、切欠き部付近の変形による弱化よりもねじ部の応力集中の影響が優るようで、ねじ部で疲労破断し、広範な試験条件でのデータを得ることが出来なかった。

図5より、疲労寿命におよぼす平均応力 σ_m の影響をみると、応力振幅 σ_a が大きいほうでは σ_m の大小によって寿命に差異が認められるが、 σ_a が小

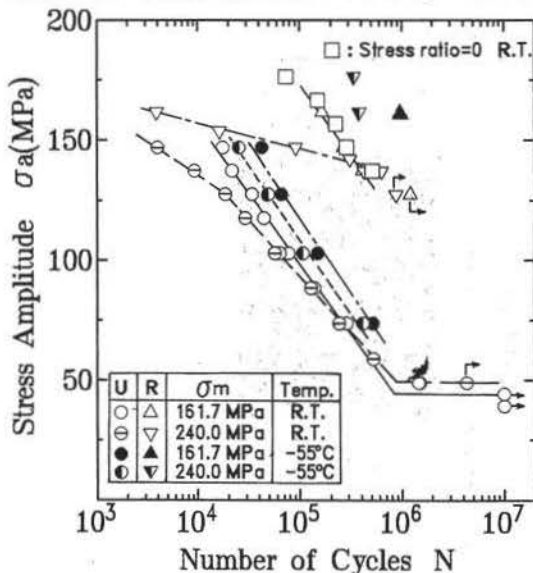


図5 S-N曲線

さくなるにしたがって、その差異は明瞭に現れなくなる傾向を示している。特に、試験片Rでは顕著である。このような特性を今少し検討するために、試験片Rについて、応力比0の片振り応力の疲労試験を行った。図5には、その結果のS-N曲線も示してある。図示のとおり、その疲労寿命(□)は $\sigma_m = 161.7$ MPaの場合のS-N曲線(△)に重なるような傾向を呈した。いま、応力比0の場合の各平均応力 σ_m は137.2, 147, 156.8, 166.6, 176.4 MPaの5種類である。したがって、試験片Rでは、少なくとも平均応力176.4 MPa以下では、疲労寿命に平均応力はほとんど影響していないことが分かる。

以上の検討より、寿命に平均応力の影響が表れるのは、そのときの平均応力と応力振幅の和、すなわち、繰返し最大応力 σ_{max} の値に起因したものであることが分かる。 σ_{max} がある値以下では寿命はほとんど応力振幅のみに支配されるが、 σ_{max} がある大きさを越えれば寿命はその σ_{max} にもかなり依存するようになる。このような σ_{max} の特性値は試験条件時に相当する変形速度や温度のときの降伏応力に深く関連しているものと思われる。

図6に、試験片Uについての室温に対する低温(-55℃)の寿命上昇の様相を示す。図の各曲線は、図5の各S-N曲線を最小二乗法で整理した式によって算出した寿命上昇比の曲線である。また、プロット点は室温のS-N曲線の式に対する実験値の上昇比である。-55℃では上昇曲線と実験値の差が大きい、傾向的には、応力振幅 σ_a が大きくなるほど低温の寿命上昇効果が増大していることが分か

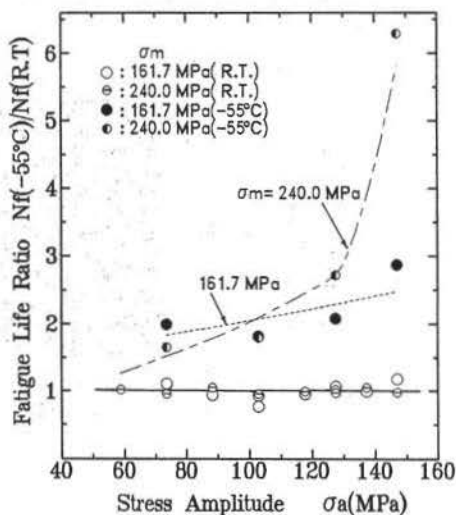


図6 寿命上昇比 (試験片U)

る。上昇曲線から推定すれば、 $\sigma_a=73.5\text{MPa}$ での約1.5倍 ($\sigma_m=240\text{MPa}$) および1.8倍 ($\sigma_m=161.7\text{MPa}$) から $\sigma_a=147\text{MPa}$ では約5.8倍 ($\sigma_m=240\text{MPa}$) および2.5倍 ($\sigma_m=161.7\text{MPa}$) に寿命が上昇していた。また、試験片Rではデータ不足であるが低温による寿命上昇効果は極めて大きくなることが予想された。

3・3 疲労変形挙動

疲労試験中の試験片つかみ部のストローク変位を計測した。その結果の一例を図7に示す。一般に、繰返し最大応力 σ_{\max} のときの Upper Stroke と繰返し最小応力 σ_{\min} のときの Lower Stroke は、疲労過程で、図のように変化して破断に至った。2章

で述べたように、Upper Stroke と Lower Stroke の間隔は1サイクル中の試験片の繰返し伸び幅 Δl 、ま

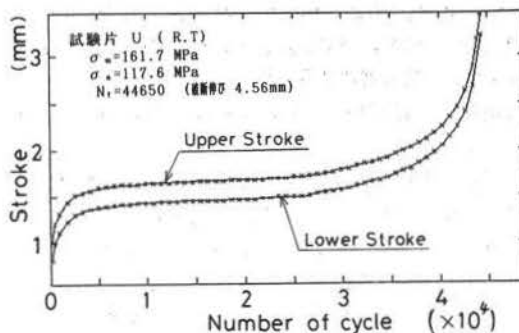


図7 疲労過程中的のストローク変位

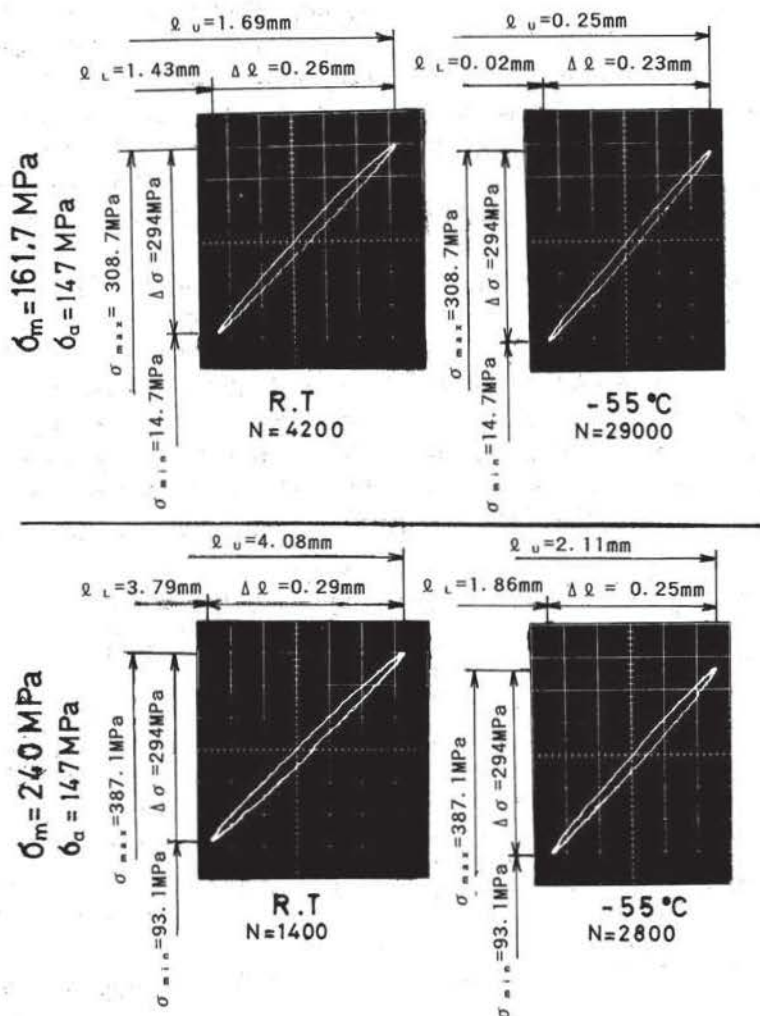


図8 履歴曲線 (試験片U)

S15C材の-55℃および室温での疲労下における塑性疲労挙動

た、両ストロークの平均値は疲労進行中の試験片の平均伸び l に、それぞれ、対応しているものとみなして繰返し変形挙動の定性的な検討を行うことが出来る。図7の中に記してある応力および温度条件の例では、 l は、まず疲労初期に急激に変化し、その後一時飽和するような様相を呈し、破断寿命に達するころになると再び急激に変化して破断に至っているが、 Δl は疲労の全過程において殆ど変化していない。このような l の変化の繰返し数依存性と Δl の様相は、他の試験条件の場合の全てに共通して観察された。

図8は、1サイクル中の応力と伸びの履歴曲線の一例を示したものである。応力幅 $\Delta\sigma$ が同一であっても Δl は平均応力と温度条件によってやや異なるようであるが、その他については、試験条件による明瞭な差異は認められ難い。なお、この履歴曲線形状は、疲労の極く初期と破断間際を除く大部分は、ほぼ変化していないようであった。

図9に、 $\Delta\sigma$ と Δl の関係を示す。両者は、試験片UとRのそれぞれで、各温度条件のもとで、共に直線的な関係にある。同時に、 Δl は、平均応力 σ_m の大小には殆ど影響されておらず、主として応力振幅 σ_a に支配されていることがわかる。また、 $\sigma_a (= \Delta\sigma/2)$ が大きくなるに従い、室温と低温(-55℃)との差異が現れてきており、低温のほうでの Δl がやや小さくなっていく傾向がみられる。このような傾向は図6に示した σ_a の大小に伴う低温下の寿命上昇の傾向に関連している特性と考えられる。

図10(a)~(d)に各試験条件における疲労過程での平均伸び l の挙動を示した。図の横軸は破断回数 N_f を寿命100とし、疲労過程を寿命比 N/N_f で表したものである。これら各図の結果から、一般的な傾向をみると、 l は大まかに三つの段階を経過して変化

しているのが認められる。第一段階は疲労の極く初期($N/N_f = 1\%$ 以下)で急激に伸び続ける期間であり、第三段階は疲労過程の後半で l が加速して伸びて行く期間である。これらの中間の第二段階は二つのタイプに分類される。一つは第一段階の後、伸び速度を減速して行き、寿命の10%程過ぎより定速

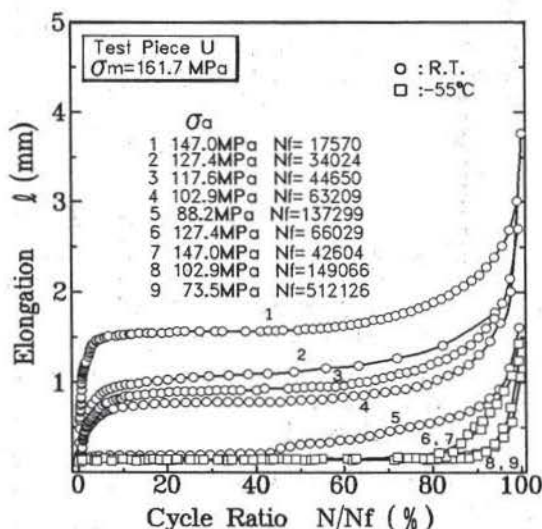
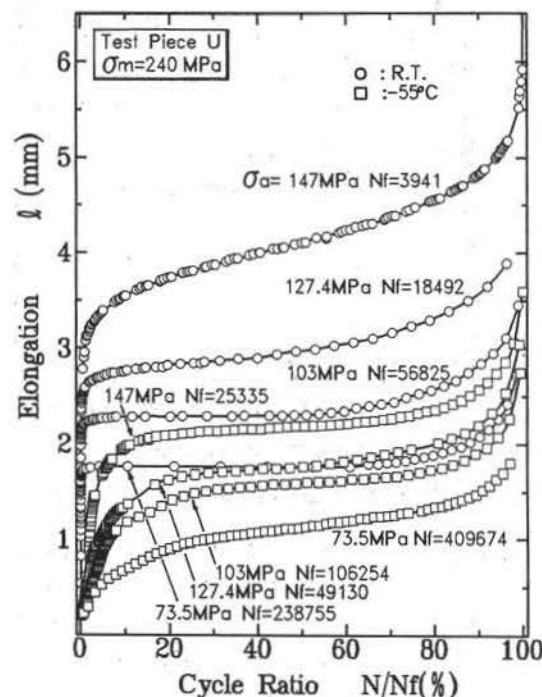
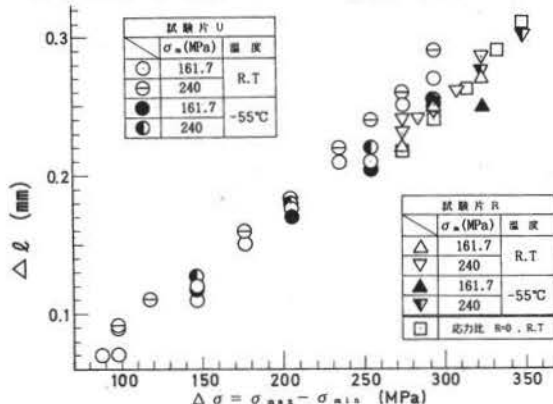
(a) 試験片 u, $\sigma_m = 161.7$ MPa(b) 試験片 u, $\sigma_m = 240$ MPa

図9 繰返し伸び幅と応力幅の関係

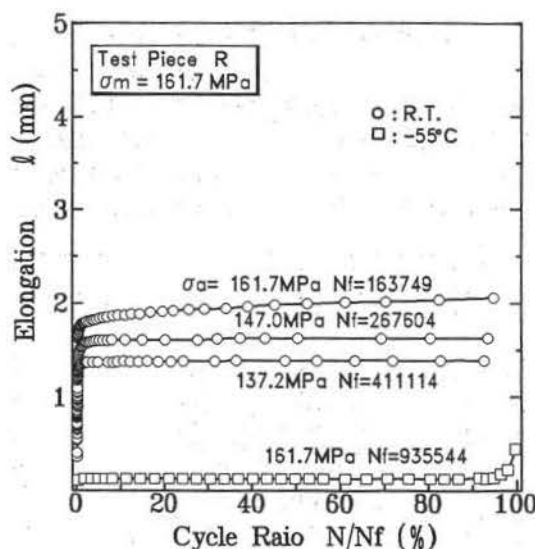
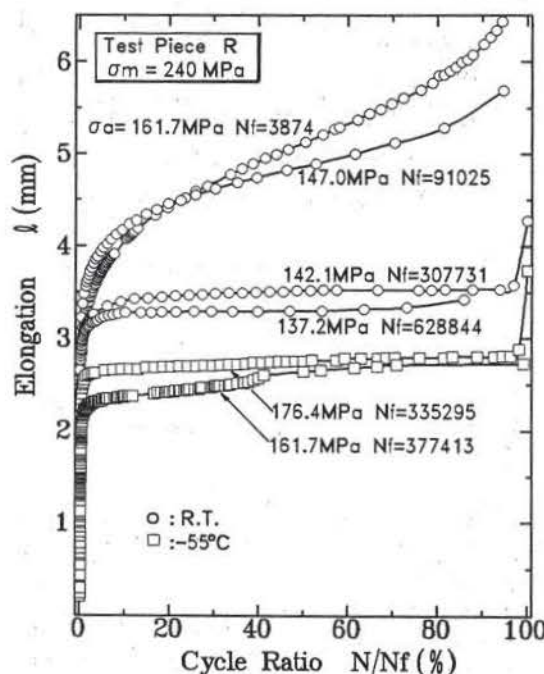
(c) 試験片 R, $\sigma_m = 161.7 \text{ MPa}$ (d) 試験片 R, $\sigma_m = 240 \text{ MPa}$

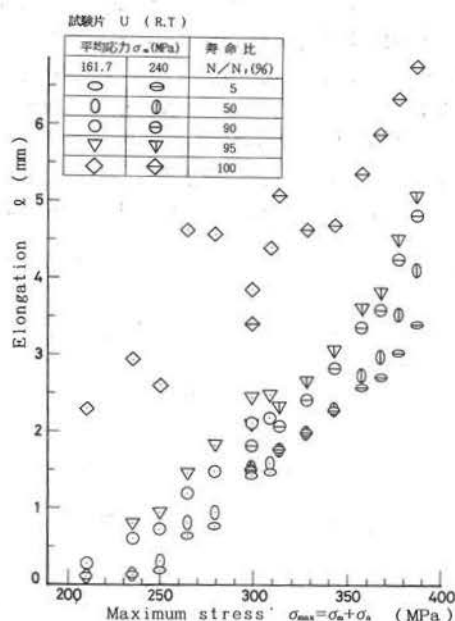
図10 疲労過程中的伸びの挙動

度で緩やかに伸びて行って第三段階に至るものであり、他の一つは第一段階を過ぎると、見かけ上は一旦伸びを停止しているような様相を見せてから第三段階へと続いていくものである。前者は寿命の短いほうであり、後者は長いほうである。試験片Uでは360MPa付近、試験片Rでは380MPa付近の繰返し最

大応力で、両者のタイプへと分かれるようであった。また、第三段階への移行が明瞭になるのは、試験片Uでは寿命90%程度からであるが、試験片Rでは破断間際のようなであった。試験片UとRでの様相の差異は、主に切欠き形状に伴う変形拘束状態の違いに起因していると考えられる。

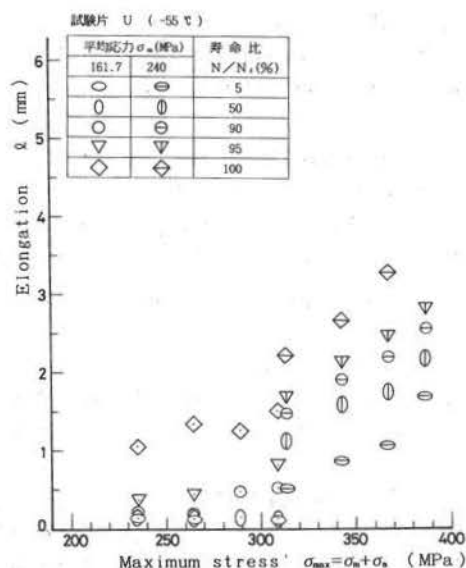
つぎに、同じ応力条件でも、低温(-55°C)になると、試験片UでもRでも、伸びは室温の場合よりかなり小さくなるのが分かる。とくに、繰返し最大応力が313MPa以下になる応力条件では極めて小さくなっていた。このような低温での変形特性を3・1節の図4にみられる静的引張の変形特性と対比してみると、試験片Uでは対応しているが試験片Rでは対応していない。しかし、単一衝撃引張の変形特性²⁾には対応している(低温下では、試験片Rのような応力集中係数の小さい切欠き形状でも、変形は減少する)。これは変形速度に起因したものと考えられ、低温での疲労変形特性には、静的引張よりも単一衝撃引張の変形特性が優性に現れると思われた。

図11(a)~(c)に、各試験状態において、寿命比5%, 50%, 90%, 95%での l および破断伸び(100%)と繰返し最大応力 σ_{max} の関係を示す。破断伸びは試験片を突き合わせて測定するのでバラツキが大きくなっている。図より各寿命比での l および破断伸びは、 σ_{max} と大略直線的な関係を呈することが認められることから、疲労過程中的伸びは応

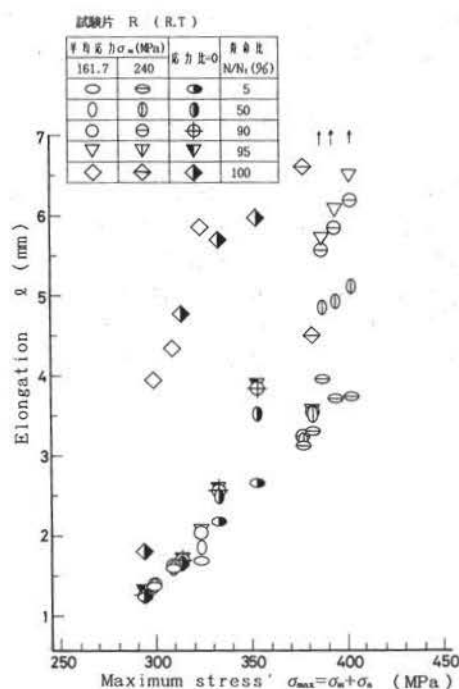


(a) 試験片 U, 室温

S15C材の-55℃および室温での疲労下における塑性疲労挙動



(b) 試験片 U, -55℃



(c) 試験片 R, 室温

図11 疲労過程中的伸びと繰返し最大応力

力振幅に依存せず、主として繰返し最大応力に支配されていることが分かる。

3・4 破断部の巨視的様相

破断後の切欠き部付近の巨視的様相をみると、切

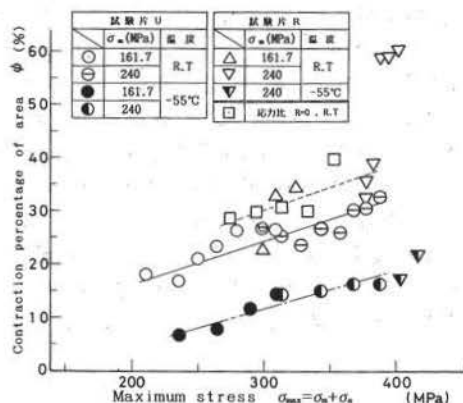


図12 断面減少率と繰返し最大応力

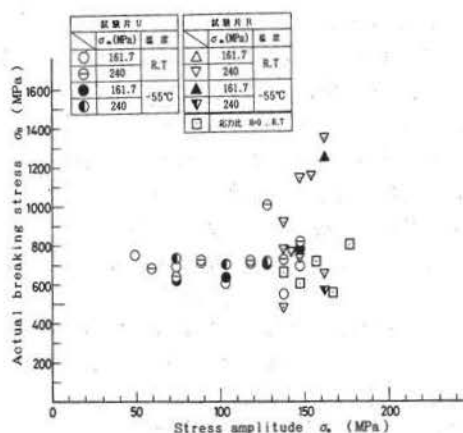


図13 最終破断応力と応力振幅

欠き部かなり大きな塑性変形が生じて破断していることが認められた。これら破面を万能投影機で観察し、断面減少率と、疲労き裂の進展領域や最終破断部の巨視的面積を測定した。

図12に、断面減少率 Ψ と最大応力 σ_{max} の関係を示す。ここで、断面減少率は切欠き底近傍の塑性変形を代表する値と考えてよい。極端に寿命が短い大変形の疲労の場合を除けば、バラツキはやや大きい。試験片UとRのそれぞれで、 σ_{max} と Ψ は直線的関係にあり、断面減少率も伸びと同様に σ_{max} に依存していることが分かる。低温(-55℃)では室温の場合に比して5割程度小さくなっており、また、切欠形状の変形拘束の様相の差異に基づいて、試験片Rのほうが試験片Uの場合よりも Ψ が大きくなっている。

破面の最終破断部領域の巨視的面積で、繰返し最大荷重を除いたものを最終破断時の真の破断応力 σ_B とみなして、各試験条件での、応力振幅 σ_a と

σ_B の関係を調べたものを図13に示す。図より、試験片Uでは、大まかには、 σ_a の大小にも温度条件にも関係なく σ_B が一定値を示しているような傾向を観察することが出来る。なお、試験片Rでは極端にバラツキが大きく傾向は不明であるが、これは変形が大きくて最終破断部領域の判定が困難になり、そのための誤差等もかなり影響している。本実験のような塑性変形の大きい疲労では、最終破断に、 σ_B が大きく関連していることが予想される。今後、最終破断部領域の測定精度をあげて検討する必要がある。

4. 結 言

S15C材を供試材とした厚さ6mmの板状試験片の中央部にU形ノッチ(試験片U)と円弧ノッチ(試験片R)を有する試験片を用い、比較的大きな平均応力 σ_m (161.7MPaと240MPa)を与えた正弦波片振り引張負荷の疲労試験を室温と低温-55℃で行って、疲労過程中的繰返し変形挙動を調べた。得られた主な結果を要約すればつぎのとおりである。

- (1) 低温(-55℃)による寿命上昇効果は、応力振幅が大きくなるほど増大する傾向がみられた。
- (2) 1サイクルの繰返し伸び幅は、疲労過程中、殆ど変化しないで一定値を呈している。その値は主に応力振幅に依存し、平均応力の影響は極めて少ない。また、応力振幅が大きくなるに従い、室温と低温の差異が少し現れ、低温のほうがやや小さくなっていく傾向がみられた。
- (3) 疲労過程中的の平均伸びは、疲労の極く初期

(寿命比1%以下)と後期(試験片Uでは寿命比90%過ぎ、試験片Rでは破断間際)で急激に変化している。その中間部の疲労過程では、緩やかに伸び続けるものと、伸びが停止しているような場合とがある。これら中間部の挙動は繰返し最大応力の大きさに依存して両者のタイプへと分かれる。

(4) 疲労過程中的の各寿命比での伸び、破断伸び、破断部断面減少率は、応力振幅に依存せず、繰返し最大応力に支配され。最大応力が大きくなるに伴ってそれらの各値も大きくなる。

(5) 鋭い切欠き(試験片U)より鈍い切欠き(試験片R)のほうが変形量が多い。温度の影響をみると、低温(-55℃)では室温よりも変形量はかなり低下する。

(6) 以上に述べた低温での疲労寿命上昇傾向や変形挙動の特性には、低温の静的引張特性や単一衝撃引張特性にみられる、降伏点上昇や変形量低下の特性が寄与しているようである。また、本実験のような塑性変形の大きい疲労での寿命や変形の挙動には繰返し最大応力が主たる支配因子となっていた。

参 考 文 献

- 1) 斎藤, 宮野, ほか2名, 秋田高専紀要, 19, 1(1984)
- 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) 西田, 応力集中, 森北出版, 558(1967)