

低温における S 35 C 炭素鋼切欠き材 の繰返し衝撃引張試験について

齋藤 稜・宮野 泰治

On Repeated Tensile Impact Test
of Notched 0.35% Carbon Steel at Low Temperature

Shigeru SAITO, Taiji MIYANO
(昭和57年10月30日受理)

In the previous papers, repeated tensile impact tests were mainly performed at elevated temperatures. In this paper, tests have been made at five temperature levels: room temperature, -8°C, -20°C, -34°C, and -73°C. The effects of low temperature on impact fatigue life were investigated for notched specimens of 0.35% carbon steel. In addition to these experiments, fractured surfaces were macroscopically observed with profile projector.

The test results obtained are summarized as follows:

- (1) Standardizing the fatigue life at room temperature, fatigue life at low temperatures has a tendency to be increased in the range of low impact energy and be decreased in the range of high impact energy.
- (2) It is indistinct that temperatures have an influence on fatigue life at low temperatures.
- (3) The fractured surfaces have different features corresponding to the levels of impact energy, temperature and impact repeated number.

1. 緒 言

前報において、S 15 C 炭素鋼を供試材とした環状 V 溝切欠き試験片を用いて、高温および -33°C 低温 (試験片温度 -22°C) における衝撃疲労強度をしらべ、特に低温の場合には衝撃エネルギーの大きい範囲と小さい範囲で、すなわち破断衝撃回数 $N=2 \times 10^4$ 付近で、室温の場合に対して強度の逆転がみられることなどを報告した¹⁾

本報においては、S 35 C 炭素鋼を供試材とした環状 V 溝切欠き試験片では、室温の場合に比し、低温下でいかなる挙動を示すかについて、試験片温度を -8°C, -20°C, -34°C, -73°C に保持して実験を行ない、破断寿命と破面の巨視的様相をしらべたものである。以下にその概要について報告する。

2. 供試材および試験片

実験に供した材料は、市販の機械構造用鋼 S 35 C

昭和58年2月

表1 化学成分 (%)

材 料	C	Si	Mn	P	S	Cu
S 35 C	0.37	0.30	0.66	0.020	0.020	0.04

表2 機械的性質

降 伏 点 kgf/mm ²	引張強さ kgf/mm ²	伸 び %	絞 り %
36.1	58.1	30.6	59.5

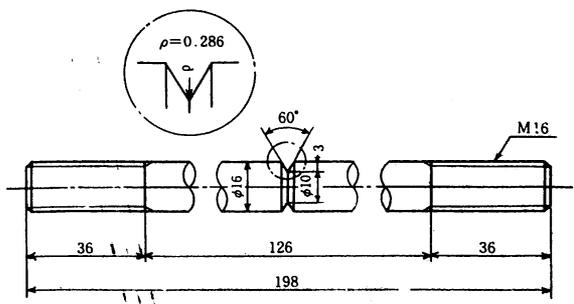


図1 試験片の形状および寸法

で、その化学成分と機械的性質を表1および表2に示す。試験片は供給のままのφ22丸棒から、前報の場合¹⁾と同形状、同寸法に機械加工したのち、860°Cで1時間の真空焼なましを施してから実験に用いた。図1に試験片の形状寸法を示す。V溝切欠部の形状係数 α は4.03である。^{2) 3)}

3. 実験装置および実験方法

衝撃疲労試験には、自作した繰返し衝撃引張試験機を用いた。その構造、機構は先に報告したとおりである。^{1) 2)}

本実験は、試験片温度が室温(約20°C)から-73°Cまでの低温下において行なわれたが、この低温ふん囲気を作る装置の概略を図2に示す。図2にみるように、試験片の周囲をかこむように試験機フレームに装置された低温槽内に、一定加圧装置により貯蔵容器から少量の液体窒素が送られ、槽内のファンにより霧状に噴射され急速に気化されて、槽内を冷却する。その温度は、試験片切欠部付近に置いた熱電対により検出し、指定温度に保持されるよう窒素ガスの噴射を電磁弁の開閉によって制御するものである。本装置によって、槽内の温度は、15分以後にはじゅうぶんに安定し、±1.5°Cの範囲内で指定温度に保持された。そのときの試験片切欠部付近の内部温度を、衝撃疲労試験に先立って、図3内の左上に示すような位置にCC熱電対を埋め込んで検出した。その結果は、試験片温度も、槽内温度が所定の温度に達してから10分後には、すでに一定温度に留まり、±0.1°C以内で、きわめて安定していることが

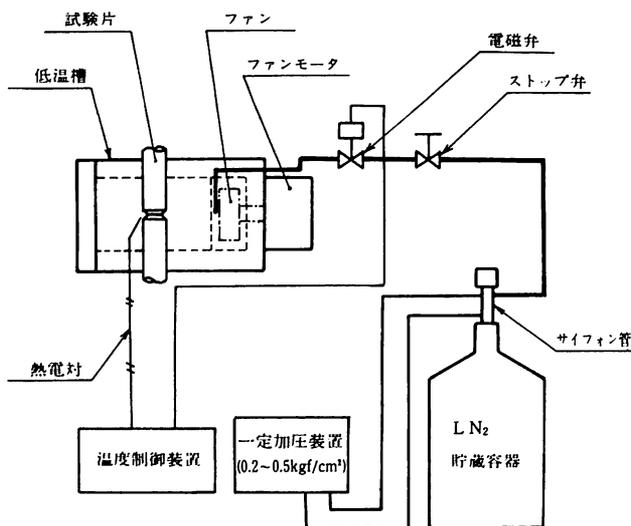


図2 低温装置概略図

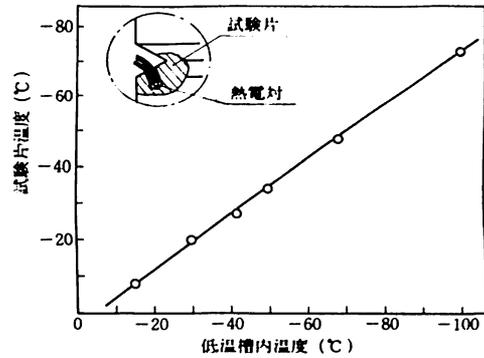


図3 低温槽内温度と試験片温度の関係

確かめられた。安定後の低温槽内と試験片温度の関係を図3に示した。以後の実験での試験片温度は、この図から推定した値である。

衝撃疲労試験では、衝撃ハンマ重量を5.34kgf一定とし、ハンマの衝突速度を30.45cm/secから92.07cm/secの間を7段階に変えることによって、衝撃エネルギーレベルを変化させた。毎分衝撃回数は507.6回である。

室温下における衝撃荷重波形の様相は前報¹⁾の場合とはほぼ同じであったが、実験の整理にあたっては、試験片に与えた衝撃エネルギーと衝撃回数で整理した。衝撃荷重波形および応力の検討は、現在継続中の実験結果と合せて報告する予定である。

衝撃疲労破断した破面の観察には、万能投影機および走査型電子顕微鏡を用いた。

4. 実験結果および考察

4.1 衝撃疲労強度

S35C炭素鋼切欠材が、室温(約20°C)、-8°C、-20°C、-34°C、-73°Cの温度におかれたときの繰返し衝撃引張による破断寿命を、縦軸に試験片切欠底の単位面積当りの衝撃エネルギー u 、横軸に破断衝撃回数 N をそれぞれ対数目盛にとり、図4に示した。図に示す曲線は室温下の衝撃疲労強度を示す $u-N$ 曲線である。

低温下の場合、室温下の場合に比して、強度のばらつきが大きくなり、低温各温度の破断寿命の傾向に、温度レベルによる明瞭な差異をみることは困難であった。しかし、低温の各温度とも衝撃エネルギーの大きい範囲では室温下より寿命は低下し、衝撃エネルギーが小さい範囲では上回るという強度の逆転現象が $N=10^4$ 付近に認められた。

このように、衝撃エネルギーレベルが小さくなって繰返し数領域が増えていく途中において、室温下と

低温における S35C 炭素鋼切欠き材の繰返し衝撃引張試験について

低温下の衝撃疲労強度が逆転する傾向は、前報の S15C 炭素鋼切欠き材の場合¹⁾と同様の傾向であった。図 5 に、本実験の -20°C の場合と前報の S15C 材 -22°C の場合の $u-N$ 曲線を合せて示した。図にみるように S35C 材は $N=1 \times 10^4$ 付近、S15C 材は $N=2 \times 10^4$ 付近で寿命が逆転していることが明らかである。なお、両材料とも試験片形状は同一（切欠き条件同一）

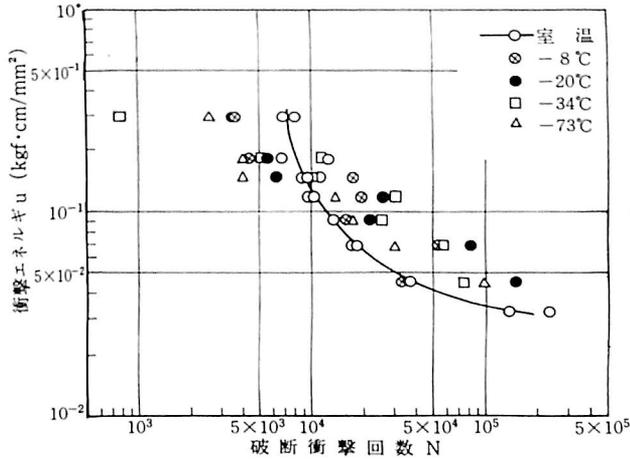


図 4 衝撃エネルギーと破断寿命

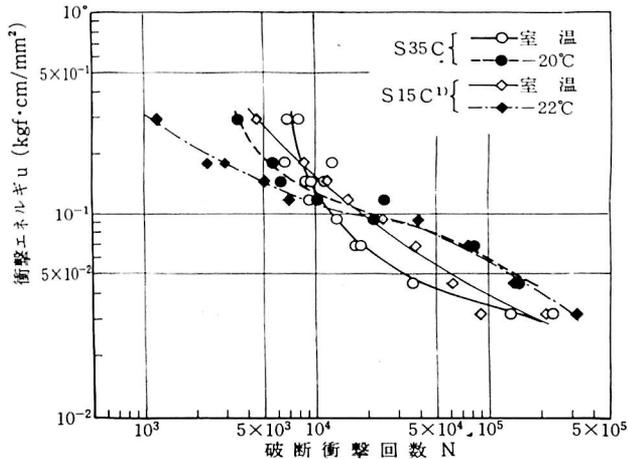


図 5 S35C 材と S15C 材の $u-N$ 線図

で、温度条件もほぼ同じ（ただし、S15C 材はドライアイスによる冷却）であるので、 $u-N$ 曲線の差異は材質と切欠き効果の相乗した影響によるものと考えられるが、繰返し数領域の高いほうでは、破断寿命に材質の差異があらわれないような傾向が認められた。

以上に示された疲労強度逆転の現象については、一般に衝撃でない疲労では低温の場合が室温の場合よりも高い強度を示す⁴⁾⁵⁾⁶⁾ことと、V ノッチシャルピー試験にあらわれる低温ぜい性⁷⁾から、前報で推察したように¹⁾、低温下での衝撃疲労挙動では、低繰返し数領域では単一衝撃試験の特性が優位にあらわれ、繰返し数領域が高くなるにつれて衝撃でない疲労の場合の疲労機構が優位にあらわれたものと考えられる。

4・2 破断寿命と巨視的破面様相について

衝撃疲労によって破断した試料の破面は、巨視的には疲労き裂進展領域と最終破断領域の二つの領域に大別出来た。ただし、衝撃エネルギーレベルの高いほうの、低温下の場合には、破面全体が最終破断領域のような様相を呈しているものもあった。これら各領域の巨視的な面積率や疲労き裂進展領域の最大距離などが、温度条件、衝撃エネルギーレベルあるいは破断衝撃回数と関連があるのではないかという予想のもとに、万能投影機で、破面を 10 倍に拡大し詳細に観察した。

図 6 に破面のマクロフラクトグラフを、図 7 には走査型電子顕微鏡によるき裂進展領域と最終破断部のマイクロフラクトグラフの例を示した。図 7-(i)(ii)の(a)に示すように、疲労き裂進展領域は、その大部分が疲労ストライエーションであり、最終破断部は図 7-(i),(ii)の(b)と(iii)の(a),(b)に示されるように、へき開破壊が主であることが知られた。しかし、最終破断部に近い部分の、巨視的にはき裂進展領域とみられるところにも、すでにへき開割れが混

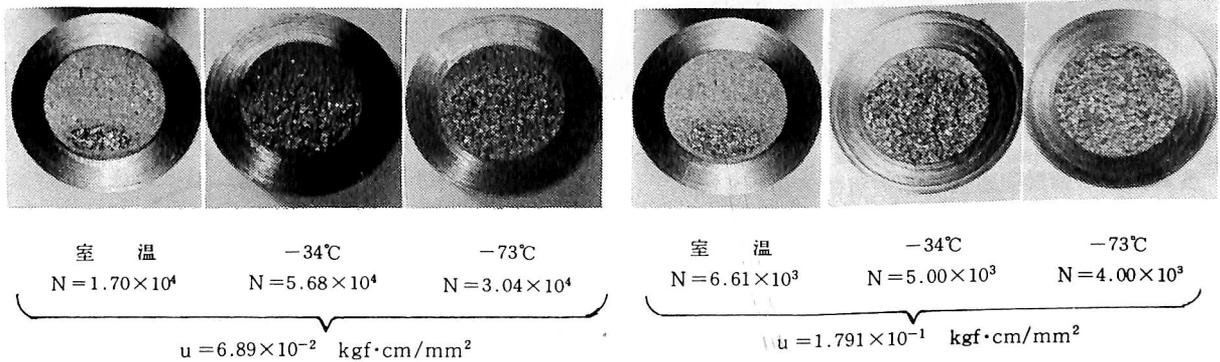
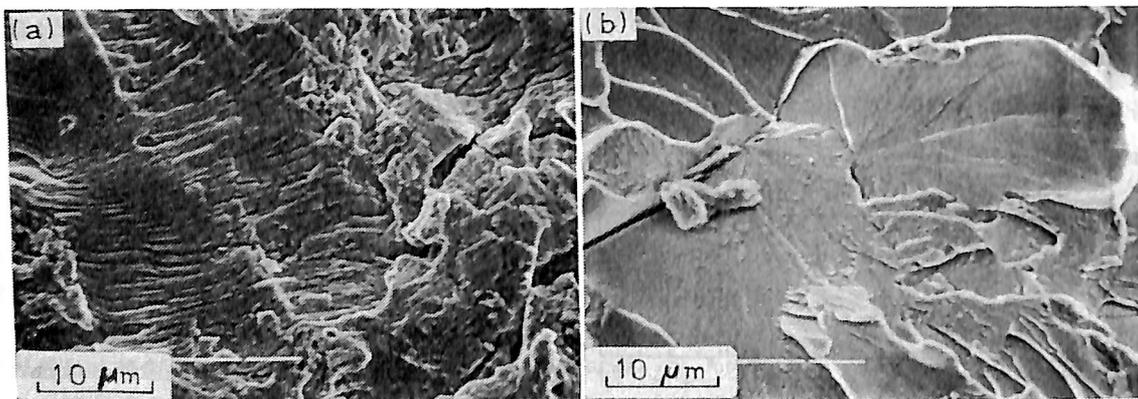


図 6 破面のマクロフォトグラフ

在していることが認められ、とくに低温の場合にその傾向が多くなっていた。

図8は、温度をパラメータとして、巨視的に疲労き裂進展領域と認められた部分の面積率 r と衝撃エネルギーの関係を示したものであり、図9は同様に疲労き裂進展領域の最大距離 l と衝撃エネルギーの関係を示したものである。図8から、同一衝撃エネルギーレベルにおいては温度が下がるにしたがって r が低下して

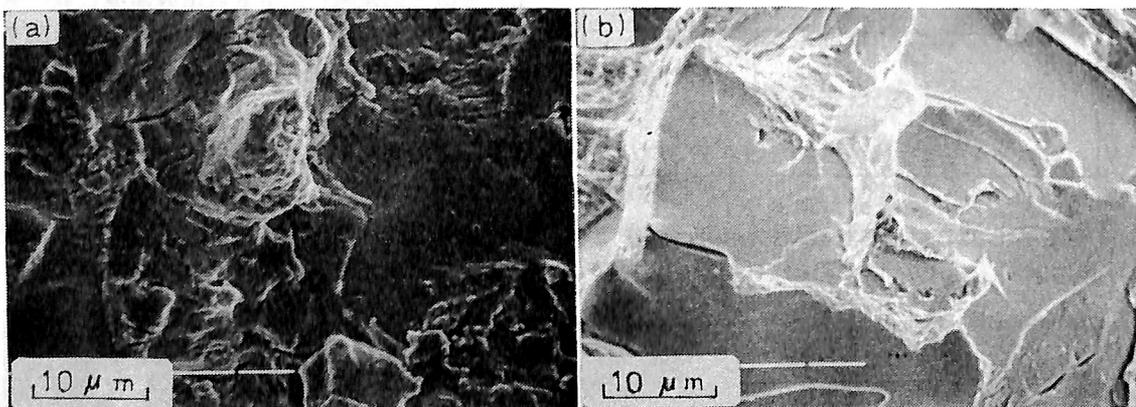
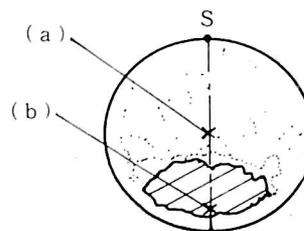
行き、また、各温度レベルにおいては衝撃エネルギーが大きくなるにつれて r は減少するが、その割合は室温がゆるやかで、低温のほうが急激である。とくに $-8^{\circ}\text{C} \sim -34^{\circ}\text{C}$ では $u=1 \times 10^{-1} \text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{mm}^2$ の付近で急激に減少し、 -73°C の場合の破面形態に近づいて行くようであった。このせん移現象のみられる付近の u の値は室温下と低温下の破断寿命の逆転する u の付近に一致していた。また、衝撃エネルギーの小さいほう



(a) S点から 4.77mm

(b) S点から 8.90mm

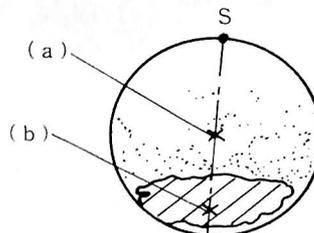
7-(i) 室温, $u=1.791 \times 10^{-1} \text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{mm}^2$ $N=6.61 \times 10^3$

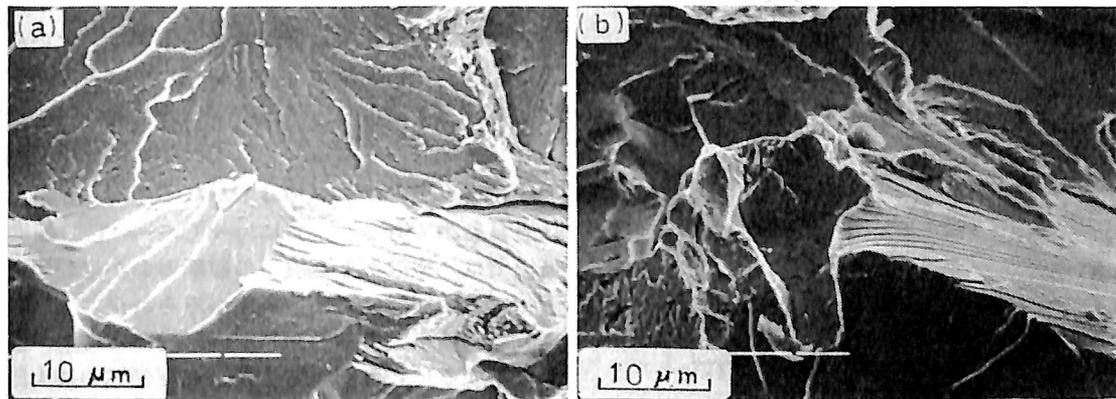


(a) S点から 4.86mm

(b) S点から 8.57mm

7-(ii) -34°C , $u=6.89 \times 10^{-2} \text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{mm}^2$, $N=5.68 \times 10^4$





(a) S点から 5.49mm
(b) S点から 1mm

7-(iii) -73°C , $u = 1.791 \times 10^{-1} \text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{mm}^2$ $N = 4.00 \times 10^3$

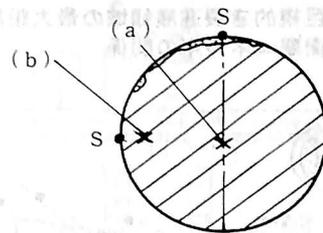


図7 破面のマイクロフォトグラフ

では、低温のほうが室温の場合よりも寿命が長いのであるが、 r においては低温のほうが室温の場合よりも小さく、 -34°C 、 -73°C ではとくに明らかである。破断寿命とき裂進展領域の面積率の関連においては、衝撃エネルギーレベルとともに試験片の温度条件も大きな影響があると考えられる。

図9において、き裂進展領域の最大距離 l は、 V 溝底の円周方向から入ったき裂が、主として、この長さ l の方向に沿って最終破断に到るまで進展して行った距離と考えられるものであるが、図8の $r-u$ の関係に類似した傾向がみられ、 l と破断寿命の関連においても、温度条件が大きな要因となるようである。

図10は、 l と破断までの衝撃回数 N の関係を示したもので、 N の増加とともに l も増加し、片対数グラフ上で、それぞれの温度レベルに線形的関係が認められるようであったが、その傾きは、室温下と低温下では大きく違い、また低温各温度レベルの間ではあまり差異がないようであった。しかし、破断までの衝撃回数が同じでも、温度が低下するに従って l が小さくなっていった。

以上の結果にみるように、巨視的破面形態においては明らかに室温下と低温下とは異なった様相を呈しており、このことは、室温と低温下では衝撃疲労の機構、破断に到るまでの挙動が異なることを示唆していると思われる。また、衝撃エネルギーと破断

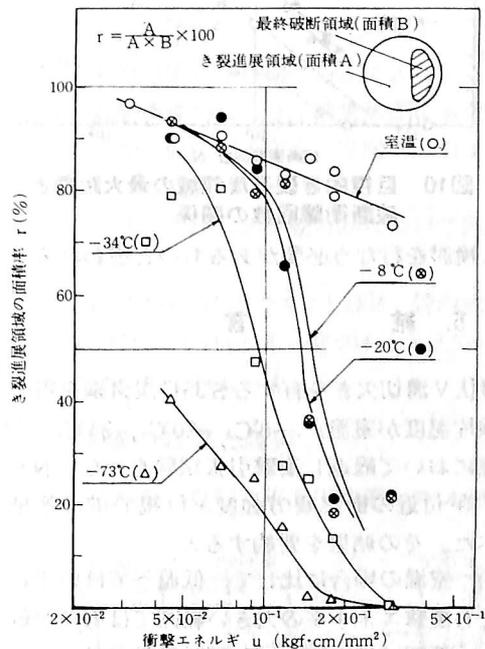


図8 破面の巨視的き裂進展領域の面積率と衝撃エネルギーの関係

寿命の関係においては、低温下で各温度レベルによる差異は明瞭にみられなかったのに対し、巨視的破面形態においては、上述のように差異があらわれていることから、低温下の衝撃疲労においても、疲労の挙動、破壊機構に温度レベルが大きく影響しているものと考えられる。今後、微視的破面形態の面か

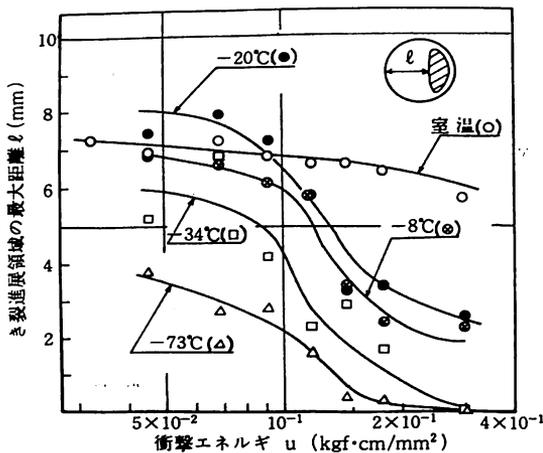


図9 巨視的き裂進展領域の最大距離と衝撃エネルギーの関係

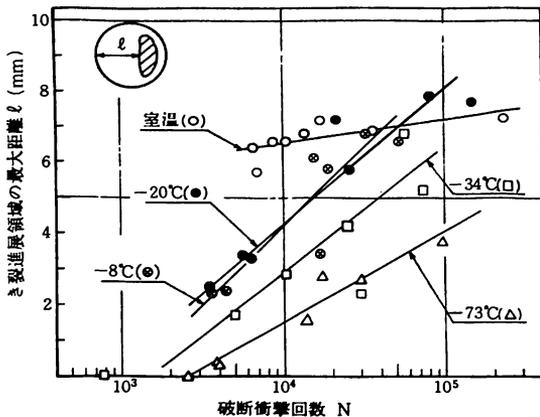


図10 巨視的き裂進展領域の最大距離と破断衝撃回数 N の関係

らも検討を行なう必要があるものと思われる。

5. 結 言

環状V溝切欠きを有するS35C炭素鋼を用いて、試験片温度が室温と、 -8°C 、 -20°C 、 -34°C 、 -73°C の低温において繰返し衝撃引張試験を行ない $N=10^3 \sim 3 \times 10^5$ 付近の衝撃疲労強度と巨視的破面形態をしらべた。その結果を要約すると

(1) 室温の場合に比して、低温下ではいずれの温度でも衝撃エネルギーの大きい範囲では寿命が低下し、小さい範囲では上回った。破断衝撃回数 $N=1 \times 10^4$ 付近で強度の逆転がみられた。

(2) しかし、低温下では、室温の場合に比して強度上のばらつきが大きくなり、低温の各温度に対しての破断寿命の差異は明瞭に認められなかった。

(3) 衝撃疲労破断した破面は、巨視的には、き裂進展領域と最終破断領域に大別できた。それら領域は、微視的観察によれば、前者は大部分に疲労スト

ライエーションがみられ、後者の領域はへき開破面であった。

(4) 巨視的なき裂進展領域の面積率 r および最大距離 l は、同一衝撃エネルギーレベルでは温度が下るにしたがって減少し、各温度レベルにおいては衝撃エネルギーが大きくなるにつれて減少する。その減少の度合は室温のほうがゆるやかなのに対し、低温のほうは急激である。とくに、 $-8^{\circ}\text{C} \sim -34^{\circ}\text{C}$ の範囲の低温では、室温下と低温下の破断寿命が逆転する付近で、破面形態のせん移現象がみられた。

(5) 破断までの衝撃回数が同じであっても、温度が低下するにしたがって、き裂進展領域の最大距離 l は短くなっていた。また、破断衝撃回数 N と l は片対数グラフ上で、それぞれの温度において線形的関係がみられた。

(6) (2) で述べたように、低温の各温度に対しては衝撃エネルギーと破断寿命との間に明瞭な差異は認められなかったが、巨視的破面形態においては低温の各温度に対しても(4)、(5)のように差異がみられた。このことは低温下の衝撃疲労においては、その疲労の機構、挙動を支配するものとして、温度条件も大きな要因の一つであることを示唆する。

最後に、本研究を行なうにあたり、実験に協力して下さった本校文部技官杉沢久雄氏と当時学生安田賢実、山田鉄也の両君に厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 斎藤, ほか2名, 秋田高専紀要 17, 1 (1982)
- 2) 斎藤, ほか3名, 秋田高専紀要 15, 1 (1980)
- 3) 西田, 応力集中, 森北出版(1971) 105
- 4) 大内田, 日本機械学会論文集 33, 252, 1183 (1973)
- 5) 菊川, ほか2名, 日本機械学会論文集 39, 327, 3223 (1973)
- 6) 田中, 中山, 日本機械学会論文集 42, 356, 1001 (1976)
- 7) たとえば, 金沢, 日本機械学会誌 66, 535, 1114 (1963)