

# 寒冷環境温度下における S35C 材の疲労強度特性

小野寺 琢\*・宮野 泰治・安藤 正昭

## Characteristics of fatigue strength on carbon steel (S35C) under cold environment

Taku ONODERA\*, Taiji MIYANO and Masaaki ANDO

(2000年11月30日受理)

Basic research of fatigue strength were conducted for practical application of carbon steel (S35C) in cold district. The influence on fatigue strength and morphology of fractured surface for the specimen with notch were investigated at room temperature,  $-3^{\circ}\text{C}$ ,  $-23^{\circ}\text{C}$  and  $-35^{\circ}\text{C}$ .

The results obtained are summarized as follows;

- (1) Fatigue life and fatigue limit increased with lowering temperature.
- (2) Rising ratio of fatigue life to that at room temperature for low stress level (high cycles to failure) at  $-23^{\circ}\text{C}$  and  $-35^{\circ}\text{C}$  were larger than that for high stress level (low cycles to failure), whereas this tendency was not evident at  $-3^{\circ}\text{C}$ . As temperature lower, the sensitivity to stress level was reflected in the rising ratio of fatigue life.
- (3) Final failure of fatigue provided dimple fracture at  $-3^{\circ}\text{C}$  and cleavage fracture at  $-23^{\circ}\text{C}$  and  $-35^{\circ}\text{C}$  by SEM fractography.

### 1. 緒 言

本研究は、寒冷地で使用される実機の鋼材部品の疲労強度特性の基礎的知見を得るために、機械構造用炭素鋼 S35C 材を用いて、引張圧縮疲労試験を行い、疲労強度におよぼす低温の影響を検討したもので、これまで報告されている、低温環境温度下にある炭素鋼の強度特性に関する一連の実験<sup>1)~9)</sup>の一つである。

本報では、切欠き材について、試験片温度が、室温、 $-3^{\circ}\text{C}$ 、 $-23^{\circ}\text{C}$ 、 $-35^{\circ}\text{C}$ の低温に置かれた場合の、部分両振り繰返し荷重での実験結果について報告する。

### 2. 試験片および実験方法

本実験に用いた材料は、市販の  $\phi 22$  の機械構造用炭素鋼 S35C で、その化学成分と機械的性質は表 1 および表 2 に示すとおりである。これら材料から、図 2 に示すような形状寸法を持つ疲労試験片を製作

した。切欠き部の応力集中係数  $\alpha$  は  $3.84^{10)}$  である。疲労試験は、電気油圧サーボ式材料試験機 (島津サーボパルサ EHF-UD-40L) を使用し、繰返し速度 6 Hz、応力比  $R = -0.5$  の部分両振りの荷重制御で行なった。

低温での疲労試験は、市販の横型冷凍庫を改造して、試験片およびチャック部装置を覆うように試験機に取り付け、試験片表面に設置した CC 電対の検出温度が所要の値になるように、冷凍庫内温度を設定して行った。この低温装置により、試験片表面温度を  $-3^{\circ}\text{C}$  ~  $-35^{\circ}\text{C}$  の範囲内で、任意設定温度  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  に保持して行なうことができた。

疲労破断後の破面の観察には、デジタルマイクロスコープおよび走査型電子顕微鏡を用いた。

表 1 化学成分 (Wt %)

材 料	C	Si	Mn	P	S	Cu
S35C	0.34	0.22	0.62	0.012	0.012	0.126

表 2 機械的性質

材 料	上降伏点 MPa	下降伏点 MPa	引張強さ MPa	真破断力 MPa	伸 び %	絞 り %
S35C	417	390	614	1142	31	55.7

\* 秋田高専専攻科学生

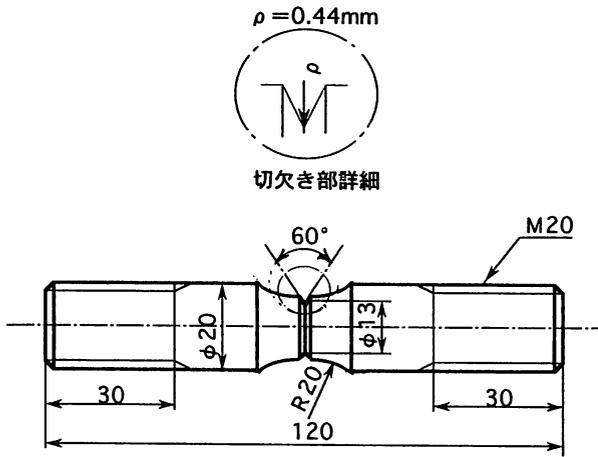


図1 試験片寸法形状

### 3. 実験結果および考察

#### 3・1 疲労寿命について

試験片表面温度が、室温（約20℃）と低温-3℃、-23℃、-35℃に置かれた場合について、疲労試験を行った結果のS-N曲線を図2に示す。応力は切欠き部断面の公称応力で表わしたものである。また、図中に引かれた寿命曲線と表示した式は、 $N = 1.5 \times 10^6$ 以下での、応力振幅と破断回数の関係を最小二乗法で近似したものである。

図より、寿命と疲労限度は温度の低下とともに上昇していることが認められる。この低温度による寿命上昇の傾向をみるため、図2に示した寿命曲線の各式(1)~(4)から、室温での寿命に対する寿命上昇比を計算すると図3に示すような曲線となる。図中に

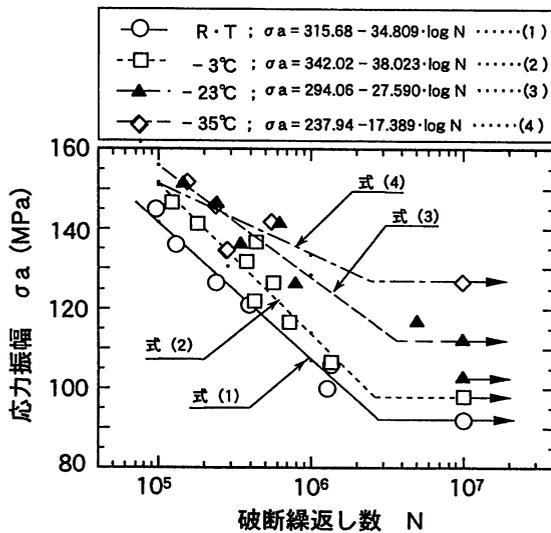


図2 S-N曲線

プロットされた各点は、室温の寿命曲線に対する実験値の上昇比である。

-35℃では高応力側（151.7 Mpaで1.77倍）から低応力側（134.5 Mpaで5.54倍）へ、-23℃でも、高応力側（151.8 Mpaで2.81倍）から低応力側（116.8 Mpaで5.14倍）へと寿命上昇の割合が応力の低下に従って増大して行く傾向を示していることが分かる。とくに、疲労限度に近い低応力では上昇比がかなり増大している。一方-3℃では、室温のものより寿命は上昇しているものの、わずかではあるが、応力の低下につれて逆に寿命の上昇の割合が減少するという傾向がみられる。しかし、その割合の変化はわずかで、実験値のバラツキの程度でみれば、応力レベルに関係なくほぼ同程度の寿命上昇とみなしてもよいように思われる。すなわち、図3の結果から、低温温度の低下とともに疲労寿命は上昇して行くことと、その上昇の割合に対する応力レベルの影響は、-3℃程度ではほとんどないが、-23℃程度の低温ではかなり大きくなり、しかも、疲労限度に近い低応力では、温度の低下とともに、上昇比がかなり増大する傾向があることが分かった。

つぎに、疲労限度の上昇の傾向を調べるための、

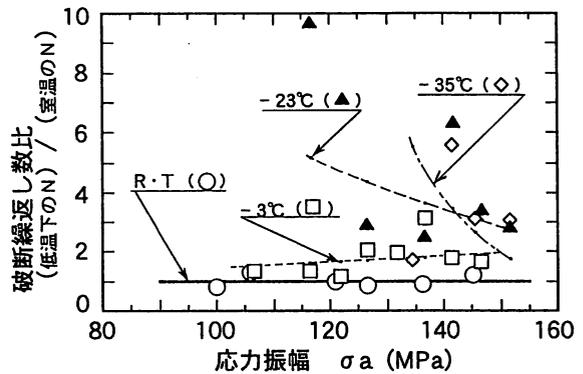


図3 疲労寿命上昇比

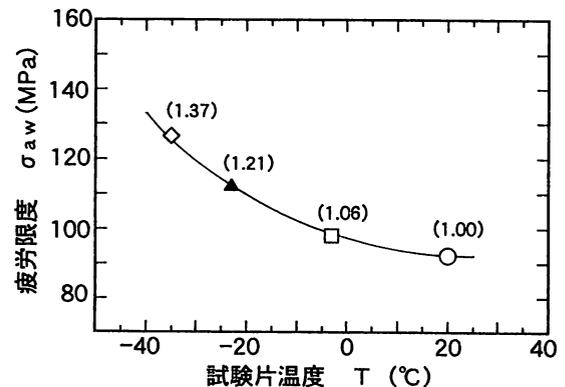


図4 疲労限度と低温温度の関係

温度と疲労限度の関係を図 4 に示した。図中の記号に記された数値は室温 (20°C) の疲労限度に対する各温度での疲労限度の上昇比である。図から、疲労限度も温度の低下とともに上昇し、その上昇の比率も温度が低くなるほど増大して行く傾向が認められる。

### 3・2 破面の様相について

疲労破面の巨視的様相をデジタルマイクロスコープを用いて観察した。その一例を図 5 に示す。図にみるように、ほとんどの破面で、疲労き裂伝ば領域の部分と最終破断部の領域が明瞭に判別できた。そして、最終破断の面は、室温での凹凸の著しい 45° 破壊<sup>11)</sup> (シャーリップ) の延性破面から、温度の低下に伴い、平坦できらきらと輝いて見える脆性的破面に移行していた。

また、き裂伝ば部の破面の様相も、温度の低下とともに脆性的様相を増しており、特に -35°C の低温では、図にみるように、へき開割れが混在していると思われる巨視的様相が明瞭に認められた。

最終破断部の微視的様相の一例を図 6 に示す。低温 -23°C および -35°C では、(b) のようにへき開破面で、脆性破壊である。しかし、低温 -3°C では、巨

視的には脆性的様相を呈しているが、SEM 観察によれば、(a) のように室温の場合と同様なディンプル破面であり、微視的にはまだ延性破壊であった。

き裂伝ば部の巨視的破面様相は、図 7 にみるように (A), (B), (C) で区切られる三つの領域が観察された。(A) は疲労過程の第 2 b 段階<sup>12)</sup> から第 2 c 段階<sup>12)</sup> への遷移部分であり、(B)~(C) 部分は第 2 c 段階から最終破断<sup>12)</sup> への、破断直前にき裂伝ば速度が著しく加速してき裂が進展した、遷移部分に対応しているのではないかと思われた。これらの領域の SEM 観察による微視的様相の例を図 8 に示す。(a) は (C) 部付近を示すもので、右側のへき開の部分最終破断部であり、左側のディンプルや粒界割れが混在している部分が第 2 c 段階後半の終了部付近とみられる。(A)~(B) 間の部分 (図 7) の微視的破面様相も、ディンプル形成や粒界割れなどの静的破壊に類似した破壊機構の特徴が観察され、この領域も第 2 c 段階と推察された。また、(A) までの領域の微視的破面様相は、図 8 の (b) および (c) に示すように、ストライエーショ

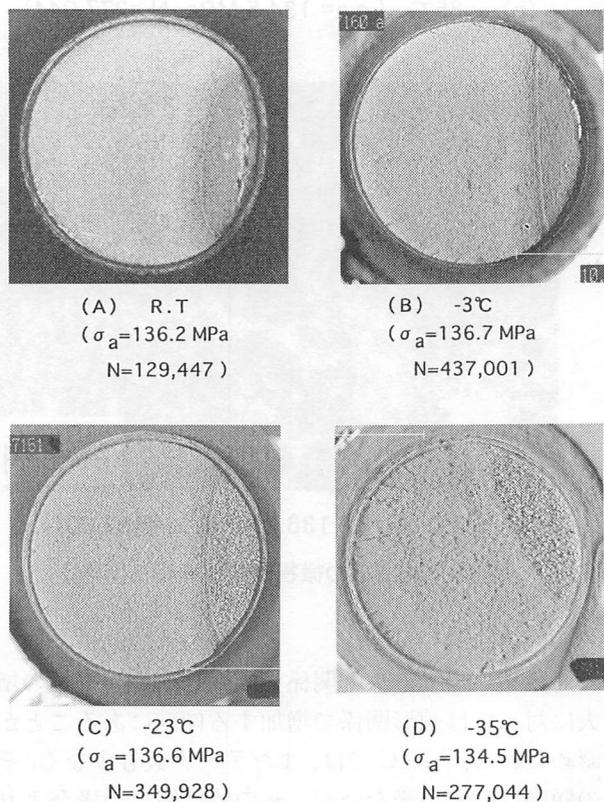
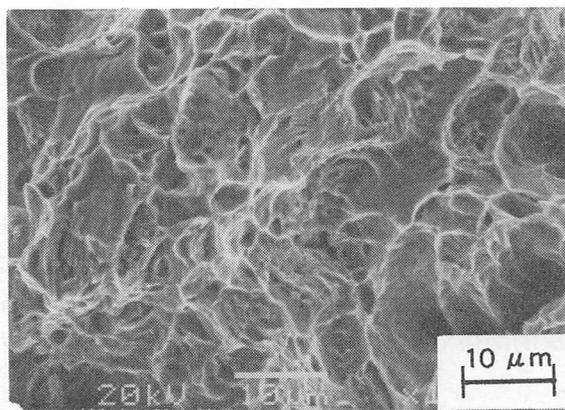
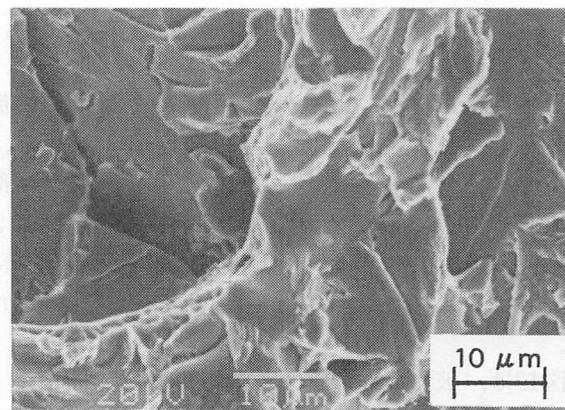


図 5 破面の巨視的様相



(a) -3°C ( $\sigma_a = 136.7 \text{ MPa}$ ,  $N = 437,001$ )



(b) -23°C ( $\sigma_a = 136.6 \text{ MPa}$ ,  $N = 349,928$ )

図 6 破断部の微視的破面様相 (SEM)

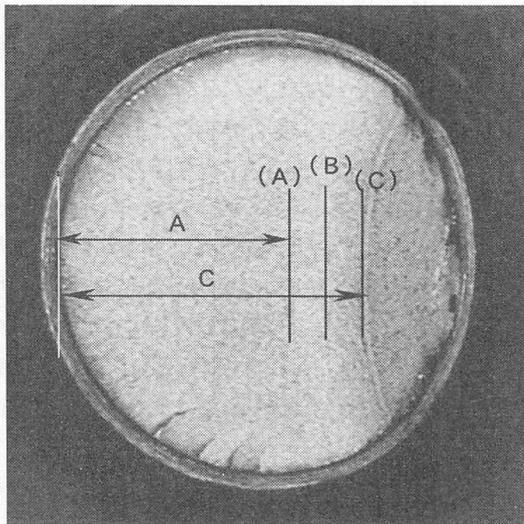


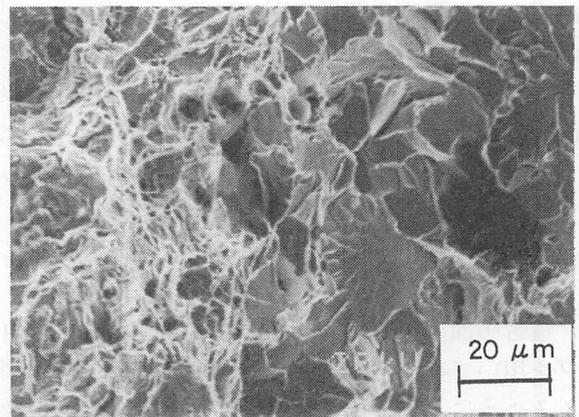
図7 き裂伝ば部の巨視的破面様相

ンやストライエーション状模様，プラトー，タイヤトラックなどの特徴的の様相が観察される第2 b 段階の破壊機構のものであった。

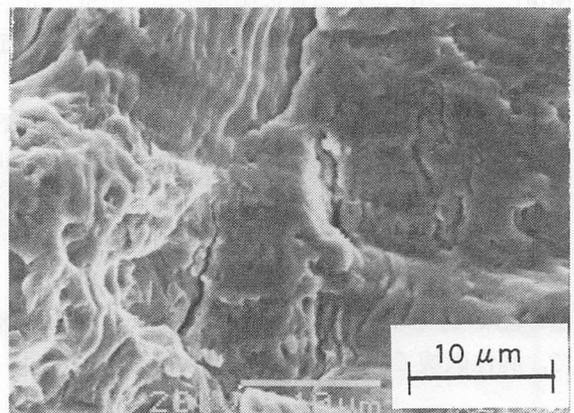
図7に示すような，疲労過程の第2 b 段階終了部と思われる(A)までの最大距離 A と，第2 c 段階終了部と思われる(C)までの最大距離 C の巨視的長さを計測し，応力振幅や疲労寿命との関係を検討すると，各温度条件で，図9および図10の例に示すように，寿命 N の増加に伴い，A，C の各長さも増大し，ばらつきは大きい，これらの各長さとは疲労寿命は片対数グラフで直線関係となる相関が認められ，また，応力振幅の増大に対して，A，C の各長さは大略，直線関係で減少する関係にあることが認められた。

図11は，A，C 各長さにおよぼす温度の影響を検討したものである。温度の低下により各長さは短くなるが，その様相は各場合で少し異なるようである。まず，A の長さでは，低温になると短くなるが，低温度の値による有意差は明瞭ではない。しかし，C の長さでは， $-3^{\circ}\text{C}$ ， $-23^{\circ}\text{C}$ ， $-35^{\circ}\text{C}$  と温度値の低下とともに減少していくような傾向を示している。温度の低下に伴い寿命は長くなるのに，最終破断部までの C の長さが短いという結果は，疲労過程第2 段階での疲労き裂の伝ば速度は温度の低下とともに減少していることを示唆しているものと推察される。

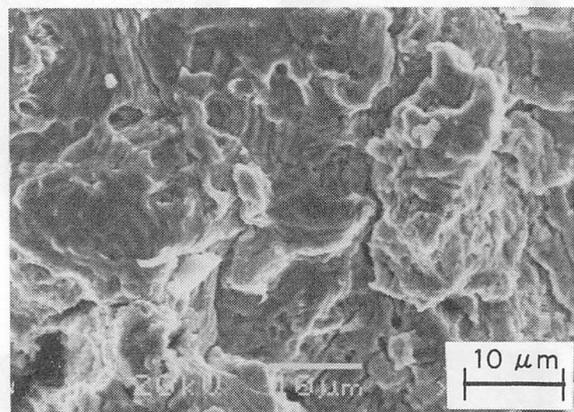
図12は，破面全体に占める最終破断部の面積率  $\gamma$  (軸方向に投影したもの) を計測して，その様相を示したものである。図にみるように室温と  $-3^{\circ}\text{C}$  ではほとんど差異がなく，疲労寿命の増加に対しては



(a)  $-35^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_a = 134.5 \text{ MPa}$ ,  $N = 277,044$ )



(b)  $-35^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_a = 134.5 \text{ MPa}$ ,  $N = 277,044$ )



(c)  $-3^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_a = 136.7 \text{ MPa}$ ,  $N = 437,001$ )

図8 破断部の微視的破面様相 (SEM)

片対数グラフで直線関係で減少し，応力振幅の増大に対しては線形関係で増加する傾向にあることが認められる。 $-35^{\circ}\text{C}$  では，まだデータ数も少なく，その傾向は特定出来ないが， $\gamma$  の値は室温の場合よりかなり大きくなっている。また， $-23^{\circ}\text{C}$  ではばらつ

寒冷環境温度下における S35C 材の疲労強度特性

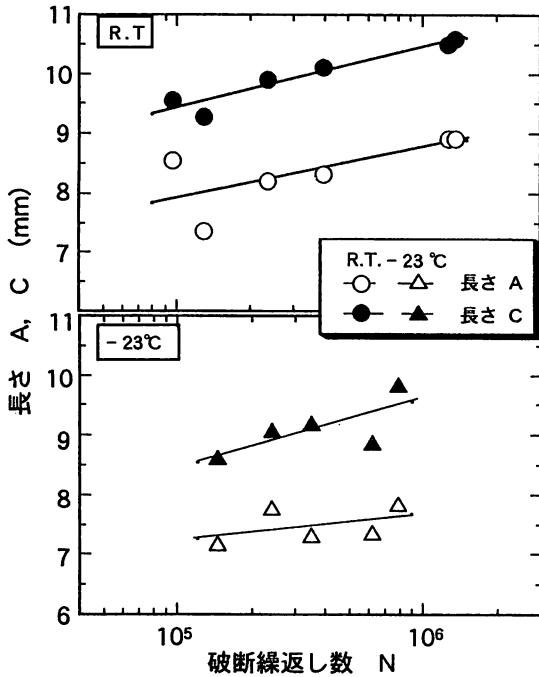


図9 疲労過程第2 b段階および第2 c段階終了の巨視的長さ A, C と破断繰返し数 N の関係

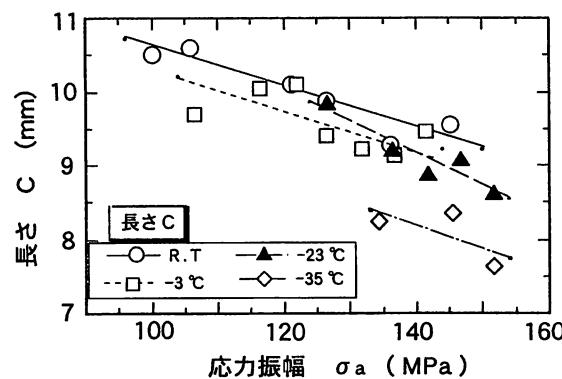
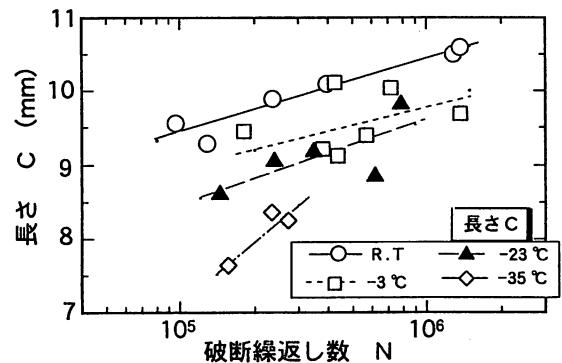
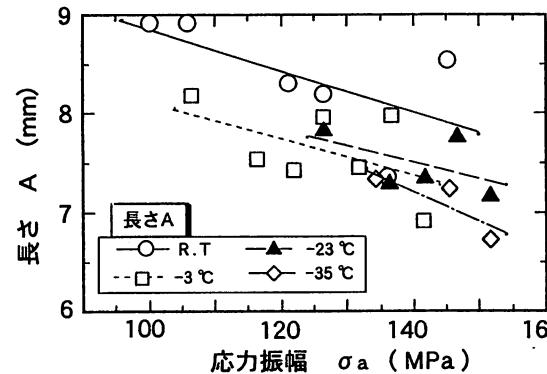
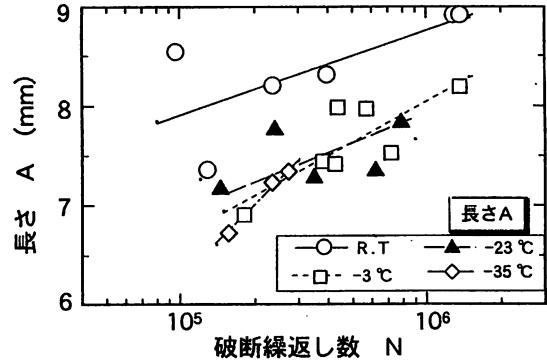


図11 疲労過程第2 b段階および第2 c段階終了の巨視的長さ A, C に及ぼす温度の影響

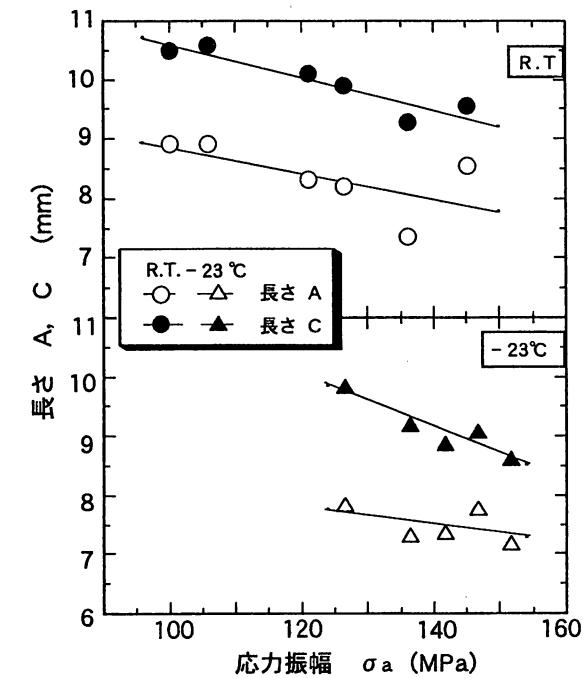


図10 疲労過程第2 b段階および第2 c段階終了の巨視的長さ A, C と応力振幅の関係

きが大きく、疲労寿命や応力振幅との相関は認められない。これらは最終破断部の破面様相が、前述したように、室温から温度の低下に伴って、45°破壊の延性破面から、平坦できらきらと輝いて見えるへき開破壊の脆性破面に移行していることと関連してい

るものと考えられる。すなわち、最終破壊が、室温や-3°Cでは延性破壊、-23°Cや-35°Cの低温で

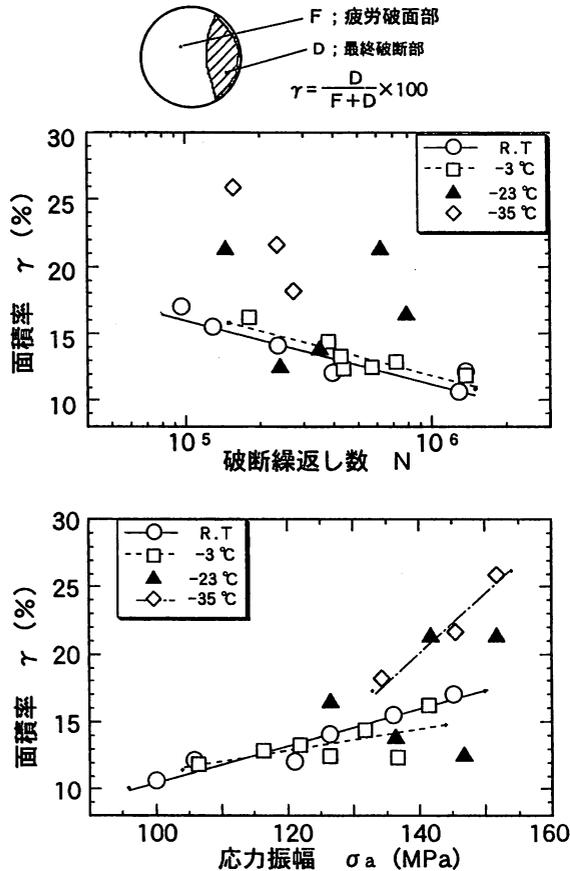


図12 最終破断部の面積率と破断繰返し数および応力振幅の関係

は脆性破壊であることによる差異であり、とくに、 $-23^{\circ}\text{C}$ では疲労過程全体では、延性破壊と脆性破壊の様相が混在しているために、そのどちらが優勢に表れたかによってばらついているものと思われる。

図13は、最大繰返し荷重  $P_1$  を最終破断部の面積  $D$  (軸方向に投影したもの) で除した値  $\sigma_t$  と繰返し応力振幅  $\sigma_a$  との関係を示したものである。 $-23^{\circ}\text{C}$  および  $-35^{\circ}\text{C}$  では  $\sigma_t$  の傾向は特定出来ないが、 $D$  の計測精度などにもよるばらつきを考慮しても、室温と  $-3^{\circ}\text{C}$  の  $\sigma_t$  は、 $\sigma_a$  のレベルに関係せず、静的引張の真破断力付近の一定値に集束しているときみなし得ることができる。これらは、室温と  $-3^{\circ}\text{C}$  では最終破断部面積  $D$  の単位面積当りの最大引張力に依存して最終破断が起るのに対し、 $-23^{\circ}\text{C}$  や  $-35^{\circ}\text{C}$  では  $D$  の大きさではなく、 $D$  の周囲のき裂前縁の応力に依存して最終破断したことを示唆している結果であると考えられる。

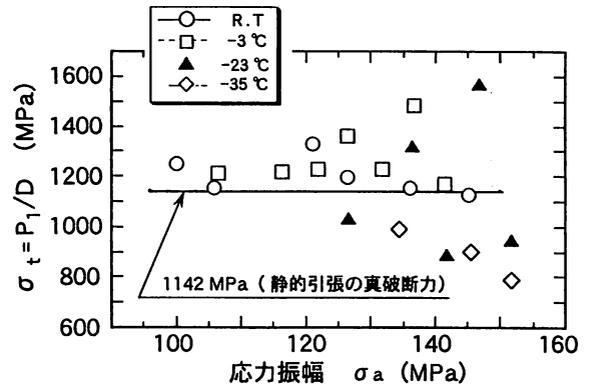


図13 (繰返し最大荷重  $P_1$  / 最終破断部面積  $D$ ) の値と応力振幅の関係

#### 4. 結 言

炭素鋼 S35C 材の、環状 V 溝切欠き試験片試験片について、試験片表面温度が室温 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) と  $-3^{\circ}\text{C}$ 、 $-23^{\circ}\text{C}$ 、 $-35.5^{\circ}\text{C}$  の低温に置かれた場合の疲労試験を行ない、疲労強度および破面様相におよぼす低温の影響を調べた。実験の範囲内で得られた結果は次のとおりである。

- (1) 疲労寿命および疲労限度は、温度の低下とともに上昇した。
- (2) S-N 曲線を最小二乗法で表示し、室温に対する疲労寿命の上昇傾向を比較すると、 $-23^{\circ}\text{C}$  (151.8 MPa で 2.81 倍、116.8 MPa で 5.14 倍)、および、 $-35^{\circ}\text{C}$  (151.7 MPa で 1.77 倍、134.5 MPa で 5.54 倍) では高応力側から低応力側の破断回数が大きくなるほうに寿命上昇割合が増大したが、 $-3^{\circ}\text{C}$  では応力の高低に関係なく、ほぼ同じ程度の寿命上昇 (1.53~1.91 倍) であった。
- (3) 疲労限度の上昇比率も温度の低下とともに増大する。
- (4) 疲労破面の最終破断部の微視的様相では、 $-23^{\circ}\text{C}$ 、 $-33^{\circ}\text{C}$  ではへき開破面で脆性破壊であり、 $-3^{\circ}\text{C}$  ではまだディンプル破面の延性破壊であった。
- (5) 破面のき裂伝ば部には、疲労過程の第 2 b 段階から第 2 c 段階への遷移部分と第 2 c 段階から最終破壊への遷移部分に対応していると思われる巨視的模様が観られた。
- (6) これらの模様までの巨視的長さや最終破断部の面積率等と、寿命や応力振幅との間の相関と温度の影響を調べた。その結果、疲労き裂の伝ば速度は温度の低下とともに減少すること、最終破壊が、

寒冷環境温度下における S35C 材の疲労強度特性

室温や $-3^{\circ}\text{C}$ では、最終破断部の面積  $D$  の大きさに依存するが、 $-23^{\circ}\text{C}$  や  $-35^{\circ}\text{C}$  では  $D$  の周辺のき裂前縁の応力に依存するものと推察された。

参考文献

- 1) 斎藤, 宮野, 秋田高専紀要, 18, 1 (1983)
- 2) 斎藤, 宮野, ほか 2 名, 秋田高専紀要, 19, 1 (1984)
- 3) 斎藤, 宮野, 秋田高専紀要, 20, 1 (1985)
- 4) 宮野, 安藤, ほか 2 名, 秋田高専紀要, 25, 1 (1990)
- 5) 宮野, 安藤, 杉沢, 秋田高専紀要, 26, 1 (1991)
- 6) 宮野, 安藤, 秋田高専紀要, 28, 1 (1993)
- 7) 宮野, 安藤, ほか 2 名, 秋田高専紀要, 29, 1 (1994)
- 8) 宮野, 安藤, 大山, 秋田高専紀要, 30, 34 (1994)
- 9) 宮野, 安藤, 秋田高専紀要, 32, 1 (1994)
- 10) 西田, 応力集中, 森北出版, 105 (1971)
- 11) 黒木, ほか 2 名, 金属の強度と破壊, 森北出版, 61 (1977)
- 12) 小寺沢, フラクトグラフィとその応用, 日刊工業, 120 (1981)